

**Betonprüfungen zur Beurteilung einer  
Alkali-Kieselsäure-Reaktion:  
Auswirkung der klimatischen Bedingungen  
auf die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen**

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
**Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)**  
genehmigte

**Dissertation**

von  
Jürgen Bokern  
geboren am 13.08.1971  
aus Steinfeld

Eingereicht am: 11. Juni 2008  
Disputation am: 27. August 2008  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann  
Prof. Dr.-Ing. G. Thielen

2008







## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit wurde in den Jahren 2003 bis 2006 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf durchgeführt. Dem Verein Deutscher Zementwerke e. V. und seiner Geschäftsführung danke ich für die Förderung der Arbeit und die Möglichkeit, die Ergebnisse der Untersuchungen für eine Dissertation zu nutzen.

Die Dissertation wurde betreut von Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Thielen. Ihm, Herrn Dr.-Ing. E. Siebel, Herrn Dr. rer. nat. H.-M. Sylla sowie Herrn Dr.-Ing. V. Feldrappe gilt mein Dank für die wertvollen Diskussionen sowie die Unterstützung bei der Konzeption der Arbeit und der Durchführung der Untersuchungen. Daneben gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann, Technische Universität Braunschweig, für sein Interesse an der Arbeit und die wertvollen Anregungen bei der Abfassung der Dissertationsschrift.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsinstituts, insbesondere denen der Abteilungen Betontechnik und Zementchemie, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich für ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Hilfe bei der Versuchsdurchführung.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr. R. Bohlander und Herrn W. Pesch, Cognis Deutschland GmbH & Co. KG Düsseldorf, für die Bereitstellung der Wassergläser und die Diskussion ihrer Eigenschaften. Den Kollegen der Abteilung TQ der Lafarge CTEC GmbH möchte ich für ihr Verständnis und ihre Unterstützung während der Ausarbeitung der Dissertationsschrift danken.

Die Dyckerhoff-Stiftung hat die Arbeit maßgeblich finanziell unterstützt. Hierfür sei ihr besonders gedankt. Ebenso sei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. „Otto von Guericke“ (AiF) für die Finanzierung eines Teils der Arbeit mit Forschungsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit gedankt.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meiner Frau Kerstin, die mich immer wieder motiviert und mir die notwendigen Freiräume für die Fertigstellung der Arbeit geschaffen hat.

Mannersdorf, Juni 2008

*Jürgen Bokern*



## Summary

Cements containing supplementary cementitious materials (latent-hydraulic or pozzolanic) as further main constituents besides clinker may have a positive effect in avoiding deleterious Alkali-Silica-Reaction (ASR). Test methods that were originally developed to assess the alkali reactivity of aggregates were used to prove the effectiveness of the supplementary cementitious materials. However, by comparing studies that were carried out in the past, it was observed that deleterious ASR that could potentially occur under real conditions might not be detected under testing conditions in the laboratory. As a consequence, the potential risk of deleterious ASR would be underestimated.

Thus, the aim of this thesis was to establish the phenomena and interactions related to ASR which occur in concrete exposed to conditions designed for laboratory trials, and which could cause the aforementioned discrepant concrete behaviour. In addition, the findings could be considered in recommendations for testing procedures related to ASR, which increases the transferability of test results to practice.

The investigations carried out on the subject dealt with both the induction phase and the damaging phase of deleterious ASR. In the test series related to the induction phase, the following conditions were applied: in a 40 °C fog chamber (NK40) according to the German Alkali-Guideline Part 3; at 60 °C above water (Ü60) according to NF P 15484; and according to a newly developed simulated outside storage regime (SAL) aimed at reflecting the outside storage applied in the Research Institute of the German Cement Works Association. The influence of humidity conditions on the alkalinity of the pore solution was determined for these storages. In order to simulate performance testing, the concrete composition and cement type were varied. In addition, the impact of higher temperature on the reaction kinetics of ASR compared to that of supplementary cementitious materials was investigated. At the same time, the related effects on the alkalinity of the pore solution and on the paste structure ( $\text{Ca(OH)}_2$ -content, porosity) of the concrete were determined. Initially, the specific behaviour of the reaction product of ASR was studied for the damaging phase (creation of swelling pressure). Then, solid water glasses ( $n\text{M}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$ ;  $n$  = molar ratio between  $\text{M}_2\text{O}$  and  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{M} = \text{Na}$  or  $\text{K}$ ) were used as a model substance for the reaction product of ASR. Its behaviour in and effect on mortar structure were investigated. To achieve this, the specially prepared mortar specimens were exposed to climatic conditions comparable to those in the test methods mentioned above.

### Deleterious ASR – way of action

The findings of the investigations did not only cover the transferability of test methods. It resulted in a more precise understanding of the way deleterious ASR

acts. With regard to the *induction period*, it was established by using pore solution analysis that ASR starts when a certain critical concentration of alkali hydroxides, which depends on the reactive aggregate type in the concrete pore solution, is exceeded. This finding is important in more than one way. Firstly, any measure which reduces the alkali concentration in the pore solution after exceeding the critical concentration is not sufficient to prevent deleterious ASR. Secondly, the critical alkali concentration can be used to develop safe cementitious systems. Subtracting all other alkali contributions (aggregates, admixtures) from the critical concentration, gives the alkali concentration limit that should not be exceeded over time by the pure cementitious system.

With regard to the *damaging period*, it was found by characterization of water glass properties (viscosity, water absorption) and damage observation of mortar bars filled with water glasses (expansion, cracks, exudations), that structural damage due to ASR can be caused by pure alkali silicate hydrates (ASH); alkali-calcium silicates are not a pre-condition. The resulting degree of damage due to ASR depends on the volume increase and the viscosity loss of the ASH due to water absorption. During the first phase of water absorption, a steadily increasing pressure leads to more damage as soon as the volume increase is constrained. However, in parallel, the ASH becomes less viscous. As a consequence, the ability of the ASH to penetrate into the surrounding paste increases. This leads to less damage with increasing water absorption in the second phase. The ASH flows into the cement paste without creating internal pressure.

Whether, and to what extent the influence of reduced viscosity becomes visible, depends on the porosity of the aggregate. It is more likely to occur if there is free volume available (like in opaline sandstone or porous flint) which prevents pressure building up due to volume increase of the ASH. Since a higher temperature and increased alkali content in the ASH reduce the viscosity of the ASH, the influence of a reduced viscosity prevails under such conditions. This means that the influence of reduced viscosity can be recognized even for dense slow/late reactive aggregates. In addition, the maximum degree of damage compared to standard conditions is less.  $\text{Ca}^{2+}$ -ions available in the vicinity of a reactive aggregate can also have an impact. If these ions react with fresh ASH and form a dense structure of alkali calcium silicate hydrate (ACSH) at the edge of a reactive aggregate, they can act as a further barrier preventing the outflow of ASH from the inner part of an aggregate. Thus, the maximum pressure, and as a consequence the degree of damage, is increased.

### **Influence of test conditions on ASR**

Establishing the impact of water absorption and leaching caused by exposure to humid environmental conditions was followed by determining the water absorption of specimens and analysis of water seepage from specimens while stored

according to the methods mentioned above. For verification, the results of the pore solution analysis were evaluated. These results were also used to observe the impact of temperature (sealed storage of specimens). In addition, CH content in cement pastes prepared and stored in similar conditions to concrete specimens was measured by simultaneous TGA and DTA. The pore size distribution was determined by mercury intrusion.

### ***Concrete with cement CEM I***

For the simulated outside storage (SAL) it was observed that the contact with water in the fog chamber directly after demoulding (curing) results in a reduced alkali concentration in the concrete pore solution, which is caused by water absorption and moderate leaching. After removing the specimen from the fog chamber, the effect of water absorption is compensated by partial drying of the specimen during the simulated (and real) outside storage. Leaching continues very slowly. With regard to temperature, there were no indications of possibly misleading phenomena. In general, the occurrence of ASR might be slightly retarded and underestimated due to the humidity effects early on during SAL. This could be avoided by curing under sealed conditions at 20 °C for 7d before exposing the specimen to field conditions. Particularly for big cubes that are used in practice, the likelihood of an underestimation is rather low.

The continuous storage of specimens in a 40 °C fog chamber (NK40) is critical in this respect. Within 7d, the alkali concentration in the pore solution is reduced due to water absorption by 10 % and remains constant afterwards. In addition, continuously heavy leaching reduces the alkali concentration in the pore solution. After 28d, a total loss in alkali concentration of about 25 % is possible, taking both phenomena into account. As a result, compared to concrete specimens under practical conditions, ASR is less likely in a 40 °C fog chamber. This is of particular concern for slow/late reactive aggregates. A higher storage temperature does not have a major impact on the initiation of ASR. The capillary volume relevant for ion transport is reduced at early ages already (7d). It possibly leads to a retardation of ASR. A higher temperature is more relevant for the damaging period as it could have two effects: it accelerates water absorption by ASH which would lead to a quicker damage (shortening testing time); and it decreases its viscosity, leading to less damage compared to ambient temperatures (as previously described). Particularly if porous alkali reactive aggregates are used, an underestimation of the possible damage under practical conditions cannot be excluded. In order to improve the reliability of this storage method, the direct exposure to water (fog) should be avoided. Storage of specimens over water should be considered. The misleading impact of reduced viscosity at a higher temperature is difficult to overcome, because a lower temperature would lead to a longer test period. However, it should be investigated whether the increasing appearance of exudations in parallel to a lessening degree of damage

could be systematically quantified and considered for assessing the risk of deleterious ASR in laboratory tests. Particular attention should be paid if heavy exudations are observed rather than no expansion/cracking during prism storage at 40 °C. This does not necessarily mean that no deterioration will occur under practical conditions, because viscosity reduces with lower temperatures and could lead to significant damage.

For the storage of specimens at *60 °C above water (Ü60)* there was almost no impact of humidity conditions during the first 28d on the alkali concentration in the pore solution. Slight drying and leaching compensate for each other. Later on, heavy leaching was detected; resulting in an alkali concentration reduction of potentially 30 % until an age of 90d. Since ASR already starts before 28d at 60 °C, the conditions for ASR during the induction period are almost correctly simulated for the possible impact of humidity conditions. In order to improve conditions, it would be possible to measure the length change of hot prisms, because moving cold prisms to warm and humid conditions leads to precipitation of water on specimen surfaces and therefore leaching. In addition to a reduced capillary pore volume at early concrete age (as observed for storage NK40), two further phenomena were detected with regard to the impact of a higher storage temperature: the thermal instability of ettringite formed during clinker hydration causes a decrease of OH<sup>-</sup>-ion in favour of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-ion concentration; and the alkali concentration was measured to be constantly less (app. 50 mmol/l). As a consequence, ASR during the induction period is less likely to occur at 60 °C. However, it might be that the phenomena described are compensated for by a higher solubility of reactive silica at this temperature. A final conclusion could not be reached on the issue for this thesis. The impact of temperature on the damaging phase can be compared to the impact described for the 40 °C fog chamber. The acceleration of water absorption and particularly the reduced viscosity that is more pronounced increases the likelihood of underestimating deleterious ASR in practice. Improvement measures and considerations mentioned in this respect for the 40 °C fog chamber can also be applied to the storage of specimens at 60 °C above water. In conclusion, despite some disadvantages, the storage at 60 °C above water should be the preferred method for testing concrete with cement CEM I and dense alkali reactive aggregates.

### ***Concrete with cement CEM II/A***

Compared to concrete with cement CEM I, particularly for the use of pozzolana (fly ash, silica fume), differences have been found. Whereas water absorption and resulting alkali concentration dilution in the pore solution is in a comparable range, the concentration reduction due to leaching is less at higher temperatures (40 °C fog chamber, 60 °C above water). Nonetheless, it is significant, therefore measures to prevent leaching and water absorption mentioned in the paragraphs above for concrete with cement CEM I should be applied.

In assessing the impact of higher storage temperature, it became evident that the start of the pozzolanic and latent hydraulic reaction is more accelerated than the start of ASR. This means that the likelihood of preventing ASR due to alkali binding, particularly by pozzolana, increases with temperature. In addition, the reaction rate of pozzolana increases at higher temperatures. Compared to standard conditions, this leads to a much higher reduction of alkali concentration in the pore solution at early concrete age (< 28d). Thus, at a high temperature, ASR is considerably less likely to start during the induction period if pozzolana is used. Therefore, an underestimation of deleterious ASR possibly occurring under practical conditions cannot be excluded. Since CH is also consumed by the pozzolana reaction, its presence in the cement paste and in the transition zone around aggregates, is also much more reduced at early age. The barrier probably formed from ASH and solved CH at ambient temperature is likely to be less dense or even partially disrupted at higher temperature at early concrete age. As a result, ASH formed inside the aggregate and already less viscous than under standard conditions is able to penetrate into the surrounding paste much earlier, leading to a lesser degree of damage (particularly valid for porous alkali reactive aggregates). This will again support an underestimation of possible deleterious ASR under practical conditions.

In order to overcome these misleading phenomena when testing concrete containing cements with pozzolana, a sealed pre-storage of specimen at 20 °C should be investigated. First ideas for the duration of pre-storage at this temperature can be derived from the observation that, independent from the temperature regime applied, the alkali concentration, CH content and capillary volume in the concrete seem to move concurrently into line after a period where the mentioned parameters significantly deviate from each other. For silica fume/slag it takes at least 28d to 56d, for fly ash 56d to 91d.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Ziel der Arbeit .....	1
1.2	Inhaltliche Übersicht .....	4
<b>2</b>	<b>Stand der Kenntnisse.....</b>	<b>5</b>
2.1	<b>Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) .....</b>	<b>5</b>
2.1.1	Überblick.....	5
2.1.2	Alkaliempfindliche Gesteinskörnungen.....	7
2.1.3	Wirksamer Alkaligehalt.....	8
2.1.4	Ablauf einer schädigenden AKR .....	9
2.1.4.1	Abgrenzung der Teilprozesse.....	9
2.1.4.2	Chemische Reaktionen.....	10
2.1.4.3	Schädigungsmechanismus .....	12
2.1.4.4	Rissausbildung in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung.....	15
2.1.5	Modellsysteme.....	16
2.1.5.1	Borsilicatglas zur Simulation der Gesteinskörnung .....	16
2.1.5.2	Wasserglas zur Simulation des Reaktionsprodukts einer AKR .....	17
2.2	<b>Einflüsse auf eine schädigende AKR.....</b>	<b>20</b>
2.2.1	Gesteinskörnung .....	20
2.2.1.1	Reaktivität.....	20
2.2.1.2	Anteil am Korngemisch (Pessimum).....	21
2.2.1.3	Bruchflächigkeit .....	22
2.2.1.4	Porosität .....	22
2.2.2	Betonzusammensetzung.....	22
2.2.2.1	w/z-Wert .....	22
2.2.2.2	Alkaligehalt im Beton .....	23
2.2.2.3	Luftgehalt .....	23
2.2.3	Umgebungsbedingungen.....	23
2.2.3.1	Temperatur .....	23
2.2.3.2	Relative Luftfeuchte im Beton.....	25
2.2.3.3	Alkalizufuhr von außen.....	26
2.3	<b>Auswirkung weiterer Hauptbestandteile im Zement .....</b>	<b>28</b>
2.3.1	Allgemeines zur Vermeidung einer AKR.....	28
2.3.2	Einfluss auf die Alkalität der Porenlösung .....	29
2.3.2.1	Allgemeines .....	29
2.3.2.2	Hüttensand.....	29
2.3.2.3	Flugasche .....	30
2.3.2.4	Silikastaub .....	31

2.3.2.5	<i>Bindungskapazität und -stabilität</i> .....	31
2.3.3	<i>Einfluss auf weitere schädigungswirksame Parameter</i> .....	32
2.3.3.1	<i>Ableitung der Parameter</i> .....	32
2.3.3.2	<i>Alkalidiffusion und Wasserpermeabilität</i> .....	33
2.3.3.3	<i>Calciumhydroxidgehalt in der Kontaktzone</i> .....	34
2.3.3.4	<i>Einfluss der Lagerungstemperatur</i> .....	36
<b>2.4</b>	<b>Prüfverfahren</b> .....	<b>38</b>
2.4.1	<i>Bedeutung und Anforderungen</i> .....	38
2.4.2	<i>Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen</i> .....	38
2.4.2.1	<i>Petrographische Beurteilung</i> .....	39
2.4.2.2	<i>Chemische Untersuchungsmethoden</i> .....	39
2.4.2.3	<i>Mörtelprüfungen</i> .....	40
2.4.2.4	<i>Betonprüfungen</i> .....	42
2.4.3	<i>Prüfung der Wirksamkeit von Zementen zur Vermeidung einer AKR</i> .....	45
2.4.4	<i>Performance-Prüfung am Beton</i> .....	47
2.4.5	<i>Betonprüfverfahren – Übertragbarkeit der Ergebnisse</i> .....	49
2.4.5.1	<i>Internationale Erfahrungen</i> .....	49
2.4.5.2	<i>Erfahrungen des FIZ</i> .....	52
<b>2.5</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerungen</b> .....	<b>57</b>
<b>3</b>	<b>Versuchsdurchführung</b> .....	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Übersicht</b> .....	<b>59</b>
<b>3.2</b>	<b>Untersuchungen zur Induktionsphase einer AKR</b> .....	<b>62</b>
3.2.1	<i>Ausgangsstoffe</i> .....	62
3.2.1.1	<i>Zement</i> .....	62
3.2.1.2	<i>Gesteinskörnungen</i> .....	63
3.2.1.3	<i>Zugabewasser</i> .....	64
3.2.2	<i>Zusammensetzung der Betone und Zementleime</i> .....	64
3.2.3	<i>Herstellung und Lagerung</i> .....	64
3.2.3.1	<i>Herstellung der Betonproben</i> .....	64
3.2.3.2	<i>Lagerung der Betonproben</i> .....	65
3.2.3.3	<i>Herstellung der Zementleime und Lagerung der Zementsteinproben</i> .....	67
3.2.4	<i>Probenpräparation und Untersuchungsmethoden</i> .....	68
3.2.4.1	<i>Frischbetoneigenschaften</i> .....	68
3.2.4.2	<i>Festbetonrohichte und –festigkeit</i> .....	68
3.2.4.3	<i>Wasseraufnahme/-abgabe des Betons</i> .....	68
3.2.4.4	<i>Auslaugung der Betonprobekörper</i> .....	69
3.2.4.5	<i>Gewinnung der Porenlösung</i> .....	69
3.2.4.6	<i>Chemische Analysen</i> .....	70
3.2.4.7	<i>Abstoppen der Hydratation</i> .....	71
3.2.4.8	<i>Simultane Thermoanalyse</i> .....	71

3.2.4.9	<i>Quecksilberdruckporosimetrie</i> .....	73
3.2.4.10	<i>Dehnung von Betonprismen</i> .....	73
<b>3.3</b>	<b>Untersuchungen zur Schädigungsphase einer AKR</b> .....	<b>74</b>
3.3.1	<i>Ausgangsstoffe</i> .....	74
3.3.1.1	<i>Zement</i> .....	74
3.3.1.2	<i>Sand</i> .....	74
3.3.1.3	<i>Wasser</i> .....	74
3.3.1.4	<i>Wassergläser</i> .....	75
3.3.1.5	<i>Calciumhydroxid (CH)</i> .....	75
3.3.2	<i>Probenpräparation</i> .....	75
3.3.2.1	<i>Herstellung der Gemische aus Wasserglas und CH</i> .....	75
3.3.2.2	<i>Zusammensetzung und Herstellung der Mörtelprismen</i> .....	76
3.3.3	<i>Lagerung</i> .....	77
3.3.4	<i>Umfang der Mörtelprimentests</i> .....	77
3.3.5	<i>Untersuchungsmethoden und –verfahren</i> .....	78
3.3.5.1	<i>Korngrößenverteilung</i> .....	78
3.3.5.2	<i>Wasseraufnahme</i> .....	79
3.3.5.3	<i>Dehnung</i> .....	79
3.3.5.4	<i>Augenscheinliche Beurteilung</i> .....	79
3.3.5.5	<i>Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen</i> .....	79
<b>4</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse</b> .....	<b>80</b>
<b>4.1</b>	<b>Allgemeine Betoneigenschaften</b> .....	<b>80</b>
4.1.1	<i>Frischbeton</i> .....	80
4.1.2	<i>Festbeton</i> .....	81
<b>4.2</b>	<b>Induktionsphase – Auswirkung der Feuchtebelastung</b> .....	<b>81</b>
4.2.1	<i>Voruntersuchungen</i> .....	81
4.2.2	<i>Zur Auswertung berechnete Größen</i> .....	82
4.2.2.1	<i>Wasseraufnahme</i> .....	82
4.2.2.2	<i>Verdünnung der Porenlösung <math>V_{PL}</math></i> .....	83
4.2.2.3	<i>Ausgelaugte Kaliummenge <math>K_{kum}</math></i> .....	83
4.2.2.4	<i>Potentiell wirksamer Kaliumanteil <math>K_{pot}</math></i> .....	84
4.2.3	<i>Verdünnung der Porenlösung durch Wasseraufnahme</i> .....	85
4.2.3.1	<i>Einfluss der Lagerung</i> .....	85
4.2.3.2	<i>Einfluss der Probekörpergröße</i> .....	86
4.2.3.3	<i>Einfluss der Zementart</i> .....	87
4.2.3.4	<i>Einfluss des w/z-Werts</i> .....	88
4.2.3.5	<i>Einfluss weiterer betontechnologischer Parameter</i> .....	90
4.2.4	<i>Reduzierung des wirksamen Kaliumanteils durch Auslaugung</i> .....	90
4.2.4.1	<i>Einfluss der Lagerung am 10-cm Würfel</i> .....	90
4.2.4.2	<i>Einfluss der Probekörpergröße</i> .....	91
4.2.4.3	<i>Einfluss des Zementgehalts</i> .....	93

4.2.4.4	<i>Einfluss des Alkaligehalts im Zement</i> .....	94
4.2.4.5	<i>Einfluss der Zementart</i> .....	95
4.2.4.6	<i>Einfluss des w/z-Werts</i> .....	97
4.2.4.7	<i>Einfluss der Sieblinie</i> .....	97
4.2.5	<i>Verifizierung der Ergebnisse anhand von Porenlösungsanalysen</i> .....	98
4.2.5.1	<i>Qualitative Verifizierung</i> .....	98
4.2.5.2	<i>Quantitative Verifizierung</i> .....	100
4.2.6	<i>Verhältnisse bei Prüfung gemäß Prüfvorschrift</i> .....	101
4.2.7	<i>Zusammenfassung</i> .....	103
<b>4.3</b>	<b>Induktionsphase – Auswirkung der Temperatur</b> .....	<b>106</b>
4.3.1	<i>Verschiebungen in der Abfolge der Einzelreaktionen</i> .....	106
4.3.1.1	<i>Allgemeines</i> .....	106
4.3.1.2	<i>Feststellung des Reaktionsbeginns</i> .....	107
4.3.1.2.1	<i>Alkali-Kieselsäure-Reaktion (<math>t_{AKR}</math>)</i> .....	107
4.3.1.2.2	<i>Reaktion weiterer Hauptbestandteile (<math>t_{HB}</math>)</i> .....	108
4.3.1.3	<i>Referenzbeton und –zementstein</i> .....	110
4.3.1.4	<i>AKR mit silifiziertem Kalkstein und Hornstein (SKH)</i> .....	111
4.3.1.5	<i>AKR mit Opalsandstein und Flint (OF)</i> .....	114
4.3.1.6	<i>Reaktion weiterer Zementhauptbestandteile</i> .....	114
4.3.1.7	<i>Abfolge der Einzelreaktionen</i> .....	116
4.3.2	<i>Abnahme der Alkalikonzentration und des CH-Anteils</i> .....	117
4.3.2.1	<i>Allgemeines</i> .....	117
4.3.2.2	<i>CEM II/A-V</i> .....	118
4.3.2.3	<i>CEM II/A-D</i> .....	119
4.3.2.4	<i>CEM II/A-S</i> .....	120
4.3.3	<i>Abnahme des transportwirksamen Kapillarporenanteils</i> .....	121
4.3.4	<i>Verringerung des pH-Werts der Porenlösung</i> .....	123
4.3.5	<i>Zusammenfassung</i> .....	125
<b>4.4</b>	<b>Überlagerung von Feuchte- und Temperatureinfluss</b> .....	<b>127</b>
<b>4.5</b>	<b>Schädigungsphase – Aufbau von Quelldrücken</b> .....	<b>129</b>
4.5.1	<i>Modellvorstellung und Einflussparameter</i> .....	129
4.5.2	<i>Wasseraufnahme wasserfreier, gemahlener Alkalisilicate</i> .....	130
4.5.2.1	<i>Voruntersuchung – Korngrößenverteilung</i> .....	130
4.5.2.2	<i>Abhängigkeit vom Verhältnis <math>\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}</math></i> .....	131
4.5.2.3	<i>Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte</i> .....	132
4.5.2.4	<i>Abhängigkeit von der Temperatur</i> .....	133
4.5.3	<i>Modellversuche zum Aufbau von Quelldrücken</i> .....	135
4.5.3.1	<i>Vorbemerkungen zur Auswertung</i> .....	135
4.5.3.1.1	<i>Dehnung und augenscheinliche Beurteilung</i> .....	135
4.5.3.1.2	<i>Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen</i> .....	136
4.5.3.2	<i>Verhalten der Stückenwassergläser</i> .....	137
4.5.3.3	<i>Einfluss der Feuchtebedingungen</i> .....	139

4.5.3.4	<i>Einfluss der Lagerungstemperatur</i> .....	141
4.5.3.5	<i>Einfluss des Alkaligehalts im Stückenwasserglas</i> .....	143
4.5.3.6	<i>Einfluss frei verfügbaren Calciumhydroxids</i> .....	145
4.5.4	<i>Zusammenfassung</i> .....	149
4.5.5	<i>Modellbildung zur Beschreibung des Schädigungsgrads</i> .....	151
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b> .....	<b>155</b>
<b>5.1</b>	<b>Ablauf einer schädigenden AKR</b> .....	<b>156</b>
5.1.1	<i>Erkenntnisse</i> .....	156
5.1.2	<i>Schlussfolgerungen für die Praxis</i> .....	158
5.1.2.1	<i>Vermeidung einer schädigenden AKR</i> .....	158
5.1.2.2	<i>Entwicklung von NA-Zementen</i> .....	158
5.1.2.3	<i>Verhalten alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen</i> .....	159
<b>5.2</b>	<b>Prüfung von Beton mit CEM I-Zement</b> .....	<b>159</b>
5.2.1	<i>Simulierte Außenlagerung (SAL) – FIZ Außenlagerung</i> .....	160
5.2.1.1	<i>Auswirkung der Umgebungsbedingungen auf eine AKR</i> ...	160
5.2.1.2	<i>Schlussfolgerungen für die Praxis</i> .....	161
5.2.2	<i>40 °C-Nebelkammerlagerung</i> .....	162
5.2.2.1	<i>Auswirkung der Prüfbedingungen auf eine AKR</i> .....	162
5.2.2.2	<i>Schlussfolgerungen für die Praxis</i> .....	163
5.2.3	<i>Lagerung bei 60 °C über Wasser</i> .....	164
5.2.3.1	<i>Auswirkung der Prüfbedingungen auf eine AKR</i> .....	164
5.2.3.2	<i>Schlussfolgerungen für die Praxis</i> .....	165
<b>5.3</b>	<b>Prüfung von Beton mit CEM II/A-Zementen</b> .....	<b>166</b>
5.3.1	<i>Auswirkung der Prüfbedingungen auf eine AKR</i> .....	166
5.3.2	<i>Schlussfolgerungen für die Praxis</i> .....	169
<b>6</b>	<b>Resümee und Ausblick</b> .....	<b>170</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>172</b>
	<b>ANHANG A – Tafeln</b> .....	<b>195</b>
	<b>ANHANG B – Bilder</b> .....	<b>219</b>



# Abkürzungen, Formelzeichen und Indices

## Abkürzungen

A,C,H,S	Oxide des Aluminiums, Calciums, Wasserstoffs und Siliciums
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
ASH	Alkalisilicathydrat $nM_2O \cdot SiO_2 \cdot xH_2O$ mit n als Molverhältnis zwischen $M_2O$ und $SiO_2$ (M/S-Verhältnis) und M = Na bzw. K
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACSH	Alkalicalciumsilicathydrat $nM_2O \cdot mCaO \cdot SiO_2 \cdot xH_2O$ mit n als Molverhältnis zwischen $M_2O$ und $SiO_2$ (M/S-Verhältnis) und M = Na bzw. K sowie mit m als Molverhältnis zwischen CaO und $SiO_2$ (C/S-Verhältnis)
BS	British Standard
CH	Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$
CSH	Calciumsilicathydrat $mCaO \cdot SiO_2 \cdot xH_2O$ mit m als Molverhältnis zwischen CaO und $SiO_2$ (C/S-Verhältnis)
CSA	Canadian Standards Association
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DIN	Deutsches Institut für Normung
FIZ	Forschungsinstitut der Zementindustrie
H	Wasser bzw. wässrige Lösung (z.B. von Probekörpern ablaufendes Wasser)
HB	Hauptbestandteil
I	Intensität einer Schädigung infolge AKR
$M_2O$	Zusammenfassende Bezeichnung für $Na_2O$ und $K_2O$
$Na_2O_{\text{Äq.}}$	Natriumäquivalent in M.-% = $Na_2O$ [M.-%] + 0,658 $K_2O$ [M.-%]
NBRI	National Building Research Institute of the Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, South Africa
NF	Norm Francaise
NMR	Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spektroskopie
PL	Porenlösung
REM	Raster-Elektronen-Mikroskopie
r.F.	relative Luftfeuchte in %
S, V, D, Q	Bezeichnung für Hüttensand, calciumarme Flugasche, Silikastaub und Metakaolin gemäß EN 197-1
v.z.	von Zement

### Formelzeichen

A	Fläche, Oberfläche in $\text{cm}^2$
a	Jahre
B	Breite eines Probekörpers in cm oder mm
c	Konzentration einer Lösung in $\text{mmol/l}$ oder $\text{mg/l}$
$c_{10}$	Verdichtungsmaß 10 min nach Zugabe aller Ausgangsstoffe
D	Durchmesser des Größtkorns einer Gesteinskörnung in mm
d	Durchmesser des Kleinstkorns einer Gesteinskörnung in mm, Tage
$d_{10}$	Ausbreitmaß 10 min nach Zugabe aller Ausgangsstoffe in cm
f	Funktion
$f_{c,28}$	Druckfestigkeit von Beton nach 28d
H	Höhe eines Probekörpers in cm oder mm
L	nominaler Abstand zwischen Messmarken bzw. Länge eines Probekörpers, jeweils in cm oder mm
l	gemessener Abstand zwischen Messmarken in mm
LP	Luftgehalt im Beton 10 min nach Zugabe aller Ausgangsstoffe in %
m	Masse in g bzw. mg
M	Kurzzeichen für die Angabe von Lösungskonzentrationen in Mol
n	Anzahl
N	Kurzzeichen für die Angabe von Lösungskonzentrationen in Normalität
t	Zeit in d
u	molare Masse in $\text{g/mol}$
V	Volumen in $\text{cm}^3$ bzw. %, Verdünnung in %
w	Wassergehalt in $\text{kg/m}^3$
$w_{\text{ch}}$	gemäß Phasenzusammensetzung maximal chemisch gebundenes Wasser in $\text{g/100g CEM I-Zement}$
$w_f$	freies Wasser im Beton (chemisch nicht gebunden) in g bzw. kg
WA	Wasseraufnahme in % des Probekörpergewichts nach dem Ausschaln
w/z	Wasser-Zement Wert
X	Variable
z	Zementgehalt in $\text{kg/m}^3$
$\Delta$	Differenz, Delta
$\Delta m_{\text{WA}}$	absolute Wasseraufnahme in g
$\varepsilon$	Dehnung in $\text{mm/m}$
$\rho$	Dichte in $\text{g/cm}^3$ ( $\text{kg/dm}^3$ )
$\rho_R$	Rohdichte $\text{g/cm}^3$
$\rho_{R,28}$	Rohdichte nach 28d in $\text{g/cm}^3$

*Indices*

0	Referenz, i.d.R. Referenzzeitpunkt
cal	berechnet
eff	effektiv
gem	gemessen
kum	kumuliert
kap	kapillar
kons	konserviert
m	molar
max	maximal
nkons	nicht konserviert
nom	nominal
pot	potentiell
spez	spezifisch



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Für dauerhaft standfeste Betonbauwerke ist es erforderlich, dass der erhärtete Beton in der Lage ist, die im Laufe der geplanten Lebensdauer auftretenden mechanischen Lasten abzutragen und etwaigen physikalischen und chemischen Beanspruchungen Stand zu halten. Darüber hinaus dürfen keine Unverträglichkeiten zwischen den Ausgangsstoffen im Beton auftreten, die diesen durch Treiberscheinungen innerlich zerstören können. Diesbezüglich relevante Erscheinungen sind das Kalk- und Magnesiatreiben, das Sulfatreiben sowie die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Letztgenannte Reaktion läuft zwischen alkaliempfindlichen Bestandteilen in Gesteinskörnungen und den vornehmlich bei der Reaktion des Zements freigesetzten Alkalihydroxiden in der Porenlösung ab.

Die Voraussetzungen für das Auftreten einer schädigenden AKR – eine nicht schädigende AKR tritt in fast jedem Beton mit kieselsäurehaltiger Gesteinskörnung auf – sind weitestgehend geklärt. Die zielsichere Vermeidung kann jedoch problematisch sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn in einer Region die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen, alkaliunempfindlichen Gesteinskörnungen eingeschränkt ist und gleichzeitig die Herstellung geeigneter Zemente auf Grund der vorliegenden Rohstoffvorkommen nicht möglich ist.

Auf Grund der im letzten Jahrzehnt zunehmend geführten Diskussion zur Nachhaltigkeit kommen vermehrt industrielle Nebenprodukte wie Hüttensand, Flugasche und Silikastaub im Zement zum Einsatz. Neben den positiven Auswirkungen im Hinblick auf Rohstoffschonung und Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wirken sich diese Stoffe auch günstig auf eine schädigende AKR aus [Sie 01, Sel 87, Tho 96].

Um zu überprüfen, ob durch den Einsatz bestimmter Zemente mit diesen Stoffen eine schädigende AKR vermieden werden kann, wurden in den vergangenen 10 Jahren vermehrt Prüfverfahren eingesetzt, die ursprünglich zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung entwickelt worden waren. Zur Beschleunigung der AKR werden die Probekörper bei erhöhten Temperaturen von bis zu 80 °C und feuchten Umgebungsbedingungen gelagert. Darüber hinaus besteht derzeit in Deutschland das Bestreben, ein Performance-Prüfverfahren zu entwickeln. Anhand dessen soll die potentielle Gefahr einer schädigenden AKR an Betonzusammensetzungen überprüft werden, die für eine bestimmte Baumaßnahme vorgesehen sind [Deu 07, Sie 06, StaJ 06].

Versuchsergebnisse zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung können durch einen Vergleich mit ihren chemisch-mineralogischen Eigenschaften und/oder mit den Erfahrungen, die mit der betreffenden oder einer ähnlichen Gesteinskörnung gesammelt wurden, abgesichert werden. Die

meisten zu diesem Zweck verwendeten Prüfverfahren wurden auf diesem Wege kalibriert. Für Versuche, in denen die Eignung von Zementen oder Zusatzstoffen, eine schädigende AKR zu vermeiden, oder die Performance eines Betons hinsichtlich des Auftretens einer schädigenden AKR überprüft werden soll, besteht diese Möglichkeit nicht. Dafür gibt es folgende Gründe:

- Die Vermeidung einer schädigenden AKR beruht auf Wechselwirkungen im Beton und nicht auf einer spezifischen Eigenschaft eines Ausgangsstoffs (z.B. der Anteil reaktiver Kieselsäure in einer Gesteinskörnung hinsichtlich deren Alkaliempfindlichkeit).
- Es liegen nur äußerst eingeschränkte Erfahrungen vor, da Puzzolane erst seit rd. 25 Jahren vermehrt im Zement bzw. Beton eingesetzt werden; in Deutschland ist der planmäßige Einsatz von Puzzolanen zur Vermeidung einer schädigenden AKR bisher nicht vorgesehen.
- Durch die Verwendung von Zementen mit weiteren Hauptbestandteilen oder Betonzusatzstoffen werden die Voraussetzungen für eine schädigende AKR verändert. Das führt ggf. zu einem verzögerten Schädigungsbeginn (> 20 Jahre).
- Die Vergleichbarkeit zwischen den aktuell verfügbaren Ausgangsstoffen und denen in bestehenden Bauwerken ist häufig nicht gegeben. Eine fehlende langfristige Dokumentation der Betonzusammensetzung begünstigt dies.

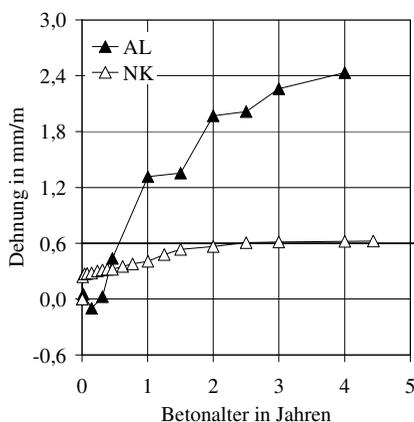


Bild 1-1: Diskrepantes Verhalten von Betonbalken in der 40 °C-Nebelkammer (NK) und im Außenlager (AL) aus Beton mit Flugasche ( $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $f = 50 \text{ kg/m}^3$ ) und norddeutschem Kies als alkaliempfindlicher Gesteinskörnung [Sie 00]

Folglich ist es umso wichtiger, dass die Reaktionsabläufe und deren Auswirkungen auf eine potentiell mögliche schädigende AKR für verschiedene Lagerungsbedingungen und Ausgangsstoffe bekannt sind. Nur mit dieser Kenntnis lassen sich Laborprüfungen entwickeln, die eine schädigende AKR unter baupraktischen Bedingungen richtig abbilden. Dass dies bei dem zuvor geschilder-

ten Vorgehen, Prüfungen zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen zu adaptieren, ggf. nicht der Fall ist, zeigen vergleichend im Freien und entsprechend den Prüfvorschriften gelagerte Betone (mit Hüttensand bzw. Puzzolanen). Sie weisen ein diskrepantes Verhalten hinsichtlich einer schädigenden AKR auf. Sich andeutende [Fou 04a, Obe 89] bzw. klar ersichtliche [Bok 04, Sie 00] Schädigungen im Freien bleiben in der Laborprüfung aus (Bild 1-1); d.h., eine potentiell mögliche AKR wird im Labor falsch eingeschätzt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, den Kenntnisstand zu den Phänomenen und Wechselwirkungen zu erweitern, die während der Prüfung von Beton im Labor im Hinblick auf eine schädigende AKR ablaufen und diese ggf. unterbinden. Darauf aufbauend sollen Vorschläge für Prüfabläufe entwickelt werden, die eine schädigende AKR im Beton unter baupraktischen Bedingungen besser abbilden.

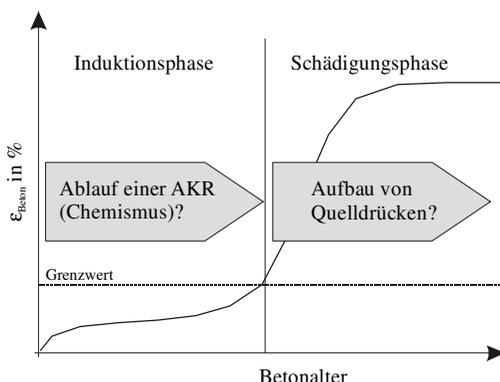


Bild 1-2: Untersuchungsansatz

Im Einzelnen wird basierend auf dem in Bild 1-2 dargestellten Ansatz für die Induktionsphase einer AKR geklärt, zu welchem Grad bei zwei standardmäßig eingesetzten Betonprüfverfahren die Voraussetzungen für den Ablauf der chemischen Reaktion einer AKR im Vergleich zu einer praxisnahen Lagerung gegeben sind. Die Auswirkung der jeweils herrschenden Feuchte- und Temperaturbedingungen werden dabei getrennt beurteilt (konservierte und nicht konservierte Lagerung). Im Hinblick auf die Schädigungsphase wird das Verhalten des Reaktionsprodukts einer AKR in Abhängigkeit verschiedener Lagerungsparameter näher betrachtet. Darauf aufbauend wird die Interaktion zwischen Reaktionsprodukt und einem porösen Gefüge bei unterschiedlichen Lagerungen untersucht. Als Ergebnis wird hier angestrebt, eine Beschreibung der Abhängigkeiten für den Aufbau von Quelldrücken und damit das Schädigungsausmaß eines Betons infolge einer schädigenden AKR zu finden. Abschließend werden die

Erkenntnisse zur Induktions- und zur Schädigungsphase in Empfehlungen für die Praxis umgesetzt.

## 1.2 Inhaltliche Übersicht

In Abschnitt 2 der Arbeit wird zunächst ein Überblick über die Grundzüge der AKR sowie der wichtigsten Einflussparameter gegeben. Im Anschluss wird die Wirkung weiterer Hauptbestandteile im Zement auf eine AKR beschrieben. Des Weiteren werden die wesentlichen Prüfverfahren vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf den vorliegenden Erfahrungen mit Betonprüfverfahren im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der damit erzielten Ergebnisse. Abschließend werden aus den vorliegenden Erkenntnissen Phänomene und Wechselwirkungen abgeleitet, die ursächlich für das dargestellte diskrepante Betonverhalten sein können.

Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3 das Untersuchungsprogramm vorgestellt, dass zur Verifizierung und Quantifizierung dieser Phänomene und Wechselwirkungen dient. Als Betonprüfverfahren werden die Prüfung in der 40 °C-Nebelkammer gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 und das 60 °C-Prüfverfahren gemäß NF P 18454 untersucht. Sie werden verglichen mit einer reproduzierbaren, im Labor simulierten Außenlagerung.

Die Untersuchungsergebnisse werden in Abschnitt 4 getrennt nach Induktions- und Schädigungsphase (Bild 1-2) ausgewertet und diskutiert. Der Einfluss der Umgebungsfeuchte auf die Voraussetzungen für eine AKR während der Induktionsphase wird mittels Wasseraufnahme und Auslaugung von Betonprobekörpern bewertet. Der Temperatureinfluss auf die Voraussetzungen für eine AKR wird anhand von Porenlösungszusammensetzungen, Porenradialverteilungen und Dehnungsmessungen an konservierten Betonproben sowie der Bestimmung des CH-Anteils in Zementstein festgestellt. Dies ermöglicht Aussagen zu Abweichungen in der Reaktionskinetik der Einzelreaktionen (AKR, Zementbestandteile) und den dadurch bedingten unterschiedlichen Bedingungen für eine AKR. Bezüglich der Schädigungsphase wird zunächst die Wasseraufnahme von unterschiedlich zusammengesetzten, gemahlten Stückenwassergläsern in Abhängigkeit von Temperatur und Umgebungsfeuchte ausgewertet. Dies erleichtert im Weiteren die Erklärung der festgestellten Schädigungsgrade von mit Wasserglas präparierten Mörtelprismen unter vergleichbaren Bedingungen und den Entwurf eines Modells, dass unterschiedliche Schädigungsgrade in Abhängigkeit der Prüfbedingungen erklärt.

Abschnitt 5 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zum Ablauf einer AKR und den Ursachen zusammen, die für die Unterschiede im Betonverhalten zwischen Laborprüfung und praxisnaher Lagerung im Hinblick auf eine schädigende

AKR verantwortlich sind. Es werden Empfehlungen gegeben, die die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der hier untersuchten Prüfverfahren verbessern können. Darüber hinaus werden Hinweise zu den für die Vermeidung einer schädigenden AKR relevanten Wechselwirkungen gegeben und eine Vorgehensweise zur Entwicklung von neuen NA-Zementen beschrieben.

Abschließend wird in Abschnitt 6 ein kurzes Resümee gezogen, ein Ausblick gegeben und weiteres Entwicklungspotential aufgezeigt.

## **2 Stand der Kenntnisse**

### **2.1 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)**

#### *2.1.1 Überblick*

Eine AKR als Ursache für eine Betonschädigung wurde als erstes 1940 in Amerika beschrieben [Sta 40]. Sie ist die am weitesten verbreitete Reaktion zwischen den Alkalihydroxiden in der Porenlösung (NaOH, KOH) und alkaliempfindlichen Bestandteilen bestimmter Gesteinskörnungen im Beton [Poo 92]. Es wird dabei aus löslicher Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) und den Alkalihydroxiden ein Alkalisilicat gebildet. Dieses hat das Bestreben Wasser aufzunehmen und zu quellen. Unter bestimmten Bedingungen kann es daher infolge auftretender Quelldrücke zum Aufbau innerer Spannungen im Beton kommen, die bei Überschreiten der Zugfestigkeit zu Gefügeschäden führen [Spr 98, VDZ 02]. Die notwendigen Voraussetzungen für das Auftreten einer schädigenden AKR sind damit [ACI 98]:

- eine ausreichend große Menge an Alkalihydroxiden,
- eine kritische Menge an Gesteinskörnungen mit alkaliempfindlicher Kieselsäure sowie
- eine ausreichende Feuchtigkeit (Wasser) im Beton.

Prinzipiell tritt eine AKR in jedem Beton mit kieselsäurehaltigen Gesteinen auf. Jedoch führt sie in der weit überwiegenden Zahl der Fälle zu keiner Beeinträchtigung des Betongefüges [Ido 97]. Beschränkt sich die Reaktion auf die Oberfläche der Gesteinskörnung, kann sie sich sogar positiv auswirken und den Verbund zwischen Gesteinskorn und dem umgebenden Zementstein verbessern [Loc 73, VDZ 02]. Sind die Voraussetzungen für eine schädigende AKR erfüllt, kann diese in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung sowohl innerhalb der ersten Jahre als auch erst nach 20 Jahren auftreten. Die äußerlichen Anzeichen dafür sind dann Dehnung und Rissbildung. Die Risse verlaufen im Allgemeinen netzartig (Map cracking). Bei Beton, der unter Druckspannung steht, richten sie sich jedoch parallel zur Richtung der Beanspruchung aus (Bild 2-1). Außerdem

können an der Betonoberfläche Aussprengungen (Pop-outs) und gelartige Ausscheidungen auftreten, die zunächst beim Austritt auf die Betonoberfläche wasserklar sind und durch Carbonatisierung weiß werden [Loc 00, VDZ 02].

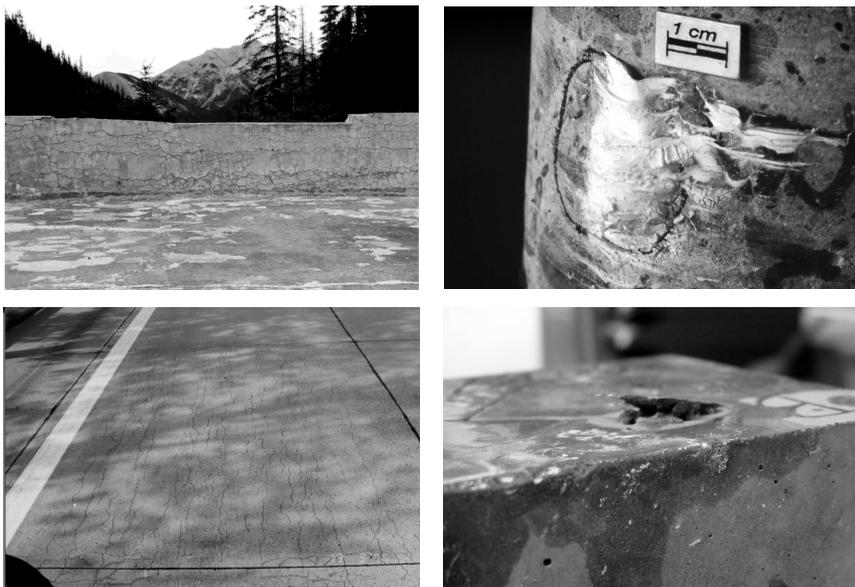


Bild 2-1: Augenscheinlich feststellbare Merkmale einer AKR (von links oben nach rechts unten: Netzrissbildung (Map cracking), weiße/gelartige Ausscheidungen, gerichtete Rissbildung bei gezwängten Bauteilen, Pop-out)

An frischen Bruchflächen sind in besonderen Fällen augenscheinlich Risse zu erkennen, die von einzelnen Gesteinskörnern ausgehen und sich in die Zementsteinmatrix fortsetzen. I.d.R. muss jedoch für die Diagnose dieser charakteristischen Merkmale einer schädigenden AKR eine mikroskopische Untersuchung erfolgen. Dabei können in Abhängigkeit von der Präparation weiße, schollenartig gebrochene oder flächenhafte, gelartige Reaktionsprodukte, die sich in Rissen und Poren ablagern, beobachtet werden. Ferner sind bei bestimmten Gesteinskörnungen Reaktionssäume erkennbar [StaJ 01, Spr 98].

Die Schädigung eines Bauwerks bzw. Bauteils infolge einer AKR geht i.d.R. einher mit einem Qualitätsverlust hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Ästhetik. Von einer Einschränkung der statischen Tragfähigkeit oder von einem notwendigen Abbruch betroffener Betonbauteile wurde bisher nur selten berichtet [Bon 73, Ido 97].

Neben der AKR werden in der Literatur noch die Alkali-Silicat- und die Alkali-Carbonat-Reaktion als Reaktion zwischen Alkalihydroxiden der Porenlösung

und alkaliempfindlichen Bestandteilen der Gesteinskörnung im Beton beschrieben. Diese Reaktionen werden im Folgenden nicht berücksichtigt.

### 2.1.2 Alkaliempfindliche Gesteinskörnungen

Die Neigung alkaliempfindlicher Bestandteile mit den Alkalihydroxiden der Porenlösung zu reagieren, wird in erster Linie durch den kristallinen Zustand der Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) in der Gesteinskörnung beeinflusst. Grobkristalliner Quarz wird nur oberflächlich angelöst und kann so zu der bereits oben beschriebenen Verbesserung des Verbundes mit dem umgebenden Zementstein führen. Wenn der Quarz dagegen, wie beispielsweise in Flinten, Kieselschiefern und Quarzporphyren, mikro- oder kryptokristallin ausgeprägt ist, kann die Gesteinskörnung eine erhöhte Alkaliempfindlichkeit aufweisen. Das Gleiche gilt, wenn Quarzanteile während gesteinsbildender Prozesse metamorph beansprucht worden sind und die Kristallstruktur sich dadurch verzerrt hat. Dieser Fall ist an der präkambrischen Grauwacke aus der Lausitz [Loc 00, Spr 98, StaJ 01] und vielen kataklastischen Gesteinen Norwegens [Jens 93, Wig 95] zu beobachten.

Tafel 2-1: Schädigende Anteile an alkaliempfindlichen Mineralen in Beton [aus Lud 74]

Reaktive Substanz	Physikalische Struktur	Gesteinstyp	Gefährdung bei x M.-%
Opal	amorph	Einschlüsse in Basalt und anderer Lava, opalhaltiger Sand-, Kalk- und Hornstein sowie Schiefer, Überzug an verschiedenen Gesteinen	> 0,25
Kieselsäureglas	amorph	Rhyolit, Andesit und andere Lava und ihre Tuffe, die eine Glasmatrix enthalten Künstliches Glas (Pyrex, Duran)	> 3 > 0,8
Chalcedon	krypto-bzw. mikrokristallin	Kieseliger Kalkstein, Flint, Hornstein, Sandstein mit Chalcedonmatrix	> 5
Cristobalit, Tridymit	kristallin	Schmelzen, vulkanische Gesteine	> 1
Quarz	kristallin	Quarzit, Sandstein, vulkanische und metamorphe Gesteine	> 20

Neben dem Quarz existieren in der Natur noch die Hochtemperaturmodifikationen der Kieselsäure Tridymit und Cristobalit, sowie der kryptokristalline Chalcedon. Sie verfügen über eine andere Kristallstruktur als der Quarz [Lud 74], ihre Löslichkeit in Wasser ist größer und sie sind dementsprechend gegen einen Alkaliangriff weniger stabil [Blan 94, Bro 02]. Darüber hinaus gibt es die noch empfindlicheren amorphen Kieselsäuren. Zu ihnen zählen der Opal, der in seinen Porenräumen bis zu 10 M.-% Wasser enthalten kann, sowie natürliche und

künstliche Gläser. Tridymit, Cristobalit, Chalcedon und Opal treten in Opalsandsteinen, Kieselkalken und Flinten auf, kieselsäurehaltige Gesteinsgläser sind in Rhyoliten, Andesiten und Quarzporphyren zu finden [Spr 98, StaJ 01]. Die dargestellte unterschiedliche Reaktivität spiegelt sich in den für eine schädigende AKR notwendigen Anteilen im Beton wieder. Tafel 2–1 gibt eine Übersicht, ab welchem Anteil mit einer Schädigung zu rechnen ist.

Generell lässt sich festhalten, dass die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung ansteigt, je höher der Anteil an löslicher Kieselsäure, je geringer der Kristallisationsgrad und je größer die innere Oberfläche der Kieselsäure ist.

### 2.1.3 Wirksamer Alkaligehalt

Als wirksamer Alkaligehalt wird der Alkaligehalt im Beton bezeichnet, der in der Porenlösung des Betons vorliegt und für eine Reaktion mit alkaliempfindlichen Bestandteilen einer Gesteinskörnung zur Verfügung steht [Sch 04, VDZ 02]. Er wird in erster Linie durch die bei der Hydratation des Zements freigesetzten Alkalien beeinflusst.

Bei CEM I-Zementen kann davon ausgegangen werden, dass sich nach 7 bis 28d eine konstante Porenlösungszusammensetzung einstellt und darin zwischen 60 und 80 % der insgesamt enthaltenen Alkalien als Alkalihydroxide vorliegen [Dia 83, Sch 04]. Der verfügbare Anteil hängt ab vom Sulfatisierungsgrad der Alkalien im Zement, vom Hydratationsgrad der Klinkerphasen und von der Fähigkeit der entstandenen CSH-Phasen, Alkalien einzubinden. Für Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen oder die Verwendung von Puzzolanen als Betonzusatzstoff kann eine derart pauschale Aussage nicht getroffen werden. Je nach den vorliegenden Bedingungen können Alkalien entweder gebunden oder freigesetzt werden. Für die Alkalibindung sind dabei drei Faktoren entscheidend: das C/S-Verhältnis in den CSH-Phasen, die Alkalikonzentration der Porenlösung und die Gesamtmenge an CSH-Phasen im Zementstein [Sch 04]. In Abschnitt 2.3.2 sind detailliertere Angaben zu finden.

Aus internationalem Schrifttum geht hervor, dass Gesteinskörnungen langfristig ebenfalls signifikante Mengen an Alkalien in die Porenlösung freisetzen können. In [Ber 04] ist der derzeitige Sachstand zusammengetragen. Danach stehen insbesondere Gesteinskörnungen im Verdacht, die vulkanische Gläser, Nephelin, Feldspäte, Glimmer, Tone oder Zeolithe enthalten. In Deutschland werden Alkalien aus Gesteinskörnungen bisher nicht berücksichtigt.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass Alkalien von außen, z.B. durch Tausalze oder Beaufschlagung mit Meerwasser, in den Beton eindringen. Wie diese Alkalien vorliegen und inwiefern sie zu einer Schädigung beitragen, ist jedoch noch nicht zweifelsfrei geklärt [Ber 03, Cha 87, Sib 98, StaJ 06]. Letzt-

lich tragen auch Zusatzmittel Alkalien in den Beton ein [Deu 07]. Durch die geringen Zugabemengen ist ihr Anteil am gesamten wirksamen Alkalianteil im Beton eher klein.

## 2.1.4 Ablauf einer schädigenden AKR

### 2.1.4.1 Abgrenzung der Teilprozesse

Eine schädigende AKR läuft in zwei sich zum Teil überlappenden Teilschritten ab. Es sind dies die chemische Reaktion zwischen löslicher Kieselsäure und den Alkalihydroxiden in der Porenlösung und der nachfolgende durch chemisch-physikalische Prozesse bestimmte Schädigungsmechanismus. Letzterer beruht dabei im Wesentlichen auf dem Quellen der zuvor gebildeten Reaktionsprodukte einer AKR [Bar 83, Dia 81, Jon 86, Lud 74].

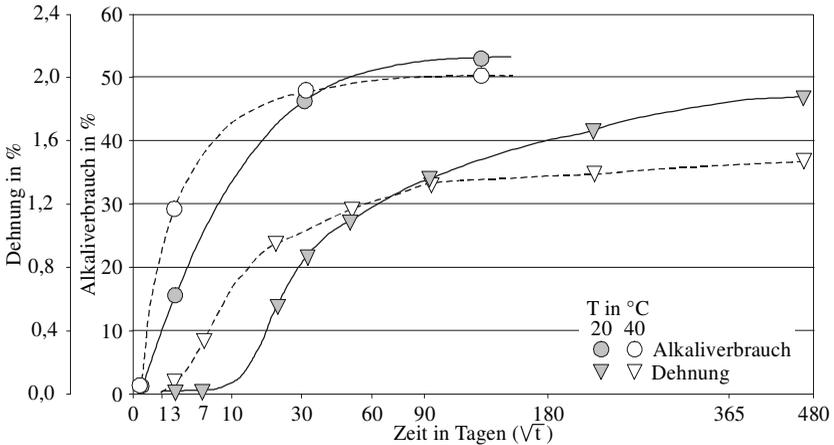


Bild 2-2: Vergleich des Alkaliverbrauchs und der Dehnung von konserviert gelagerten Mörtelprismen mit 8 % Opal (Beltane) bei 20 °C und 40 °C [Dia 81]

Bild 2-2 verdeutlicht diese Aufteilung. Es zeigt für bei 20 bzw. 40 °C gelagerte Mörtelprismen zum einen den Alkaliverbrauch während der chemischen Reaktion und zum anderen die durch das Quellen hervorgerufene Dehnung als Indiz für eine Gefügeschädigung. Zwischen dem Beginn einer AKR (Alkaliverbrauch) und einer signifikanten Dehnung vergingen demnach in Abhängigkeit von der Temperatur etwa 7 bzw. 15d. Ferner waren bereits mehr als zwei Drittel der am Ende umgesetzten Alkalien bis zu dem Zeitpunkt verbraucht, an dem eine erkennbare Dehnung einsetzte. Der Großteil der in Abschnitt 2.1.1 im groben skizzierten chemischen Abläufe einer AKR läuft demnach vor Einsetzen

des eigentlichen für einen Beton nachteiligen Schädigungsprozesses ab. Sie sind damit die bestimmenden Mechanismen in der Induktionsphase.

#### 2.1.4.2 Chemische Reaktionen

In Wasser läuft die Auflösung von Kieselsäure gemäß folgender chemischer Gleichung ab:



Bei einer AKR im Beton findet die Auflösung in dieser Form nicht statt. Der Umfang der Auflösung und ihre letztendliche Ausprägung hängen hier stark vom pH-Wert und weiteren Ionen in der Porenlösung ab [Bro 02]. Der durch die Alkalien bedingte hohe pH-Wert führt dazu, dass die Kieselsäure in deprotonierter Form in Lösung geht, d.h. die Silanolgruppe (Si-OH) gibt ihr Wasserstoffatom ab und dieses verbindet sich mit einem OH<sup>-</sup>-Ion zu Wasser (Bild 2-3 a)). Bei sehr hohem Angebot an OH<sup>-</sup>-Ionen greifen diese im Weiteren die Siloxanbindungen (Si-O-Si) an und lösen sie auf. Dabei entstehen wiederum deprotonierte Silanolgruppen und Wasser (Bild 2-3 b)).

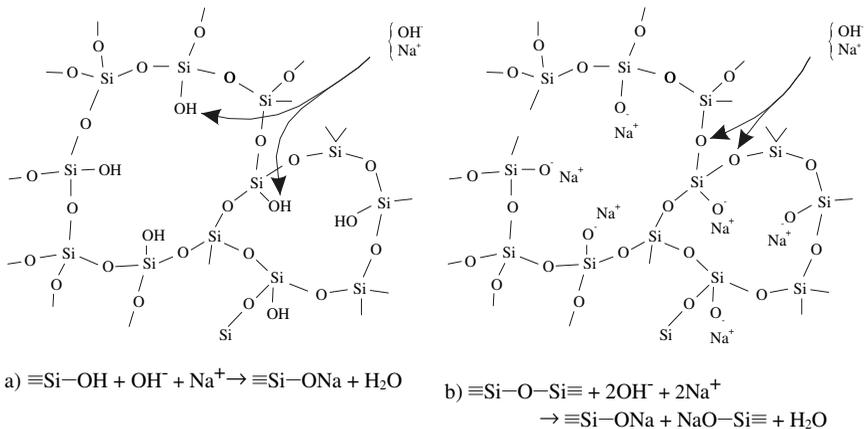


Bild 2-3: Schematische Darstellung der AKR in einer gestörten Kieselsäurestruktur [Gla 81]

- a) Deprotonierung und Absättigung mit Natrium
- b) Angriff auf die Siloxanbindung, Zerstörung der Kieselsäure

Der eigentliche Auflösungsprozess einer AKR ist demnach durch die OH<sup>-</sup>-Ionen bedingt. Das verdeutlicht auch Bild 2-4, in dem eine exponentiell ansteigende Löslichkeit amorpher Kieselsäure in Abhängigkeit vom pH-Wert dargestellt ist. In [Bern 04] wurde die Darstellung über den pH-Wert von 12 hinaus und damit in den pH-Wertebereich des Betons erweitert.

In reinen Kieselsäurelösungen setzt ab einer gewissen Kieselsäurekonzentration ein Polymerisationsprozess ein. Der Polymerisationsgrad und die sich ausbildenden Strukturen im Gleichgewichtszustand werden durch den pH-Wert bestimmt. Ein durch einen hohen pH-Wert begründeter hoher Deprotonierungsgrad (hohe negative Ladung) und die daraus resultierenden Abstoßungskräfte zwischen den Molekülen wirken einer Polymerisation entgegen und stabilisieren die Lösung [Bern 04, May 39].

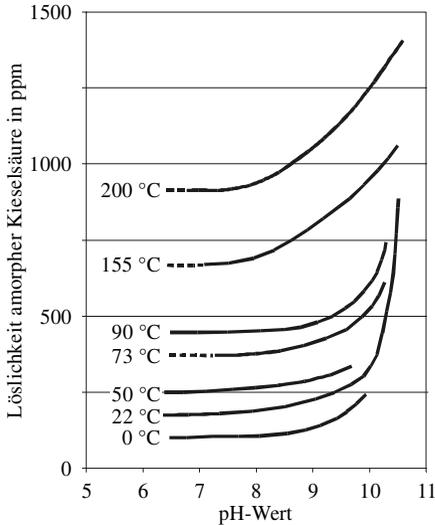


Bild 2-4: Löslichkeit amorpher Kieselsäure in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur [Ile 78]

Auf Grund der in der Porenlösung eines Betons zusätzlich reichlich vorliegenden Kationen  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  wird das dargestellte Gleichgewichtssystem gestört. Die Kationen gehen mit den deprotonierten Kieselsäuren eine Verbindung ein und bilden ein Alkalisilicathydrat, im Folgenden mit ASH bezeichnet (Bild 2-3). Da dem System so Kieselsäure entzogen wird, wird diese nachgelöst, um den Gleichgewichtszustand entsprechend dem vorliegenden pH-Wert wieder herzustellen. Diese können wiederum mit aus der Porenlösung nachgelieferten Alkalien reagieren. Die reaktiven Bestandteile einer Gesteinskörnung werden sukzessiv zerstört bis der pH-Wert nicht mehr ausreicht, die gestörte Kieselsäure anzugreifen. Zusätzlich wird auf Grund der gegenüber dem Wasserstoff größeren Wechselwirkung der Alkalien mit den Wassermolekülen in der Umgebung die Löslichkeit der Kieselsäure unter Normalbedingungen und unabhängig vom pH-Wert erhöht [Bro 02, Wil 94]. Insgesamt werden bei einer AKR sowohl die Auflösung der Kieselsäure als auch die sich ausbildenden Strukturen im Gleichgewichtszustand des ASH maßgeblich durch die Alkalien mit beeinflusst und sind nicht nur eine reine Funktion des pH-Werts.

Neben den Alkalien befinden sich auch  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen in der Porenlösung und in zahlreichen Veröffentlichungen wird von einer Beteiligung dieser Ionen an einer AKR ausgegangen [Cha 86, Cha 05, Lud 74, Pow 55a, Wan 91]. Auch der Nachweis von Ca in den Reaktionsprodukten deutet darauf hin. Der Anteil nimmt dabei i.d.R. mit der Entfernung zum umliegenden Zementstein ab [Brou 93, Cha 86, Jak 93, Jens 93, Knu 75, Reg 89]. Zurückgeführt wird dieses Verhalten auf eine gegenüber Alkalien erhöhte Neigung, chemische Verbindungen einzugehen [Bern 04, Cha 05]. Eine deutlich höhere Ladungsdichte wird dafür als Ursache genannt (Tafel 2-2). Von chemischer Seite betrachtet verbindet sich das  $\text{Ca}^{2+}$ -Ion wie die Alkalien mit den deprotonierten Kieselsäureoberflächen. Jedoch agiert es auf Grund seiner zwei Bindungsmöglichkeiten im Gegensatz zu den Alkalien als Netzwerkbildner [Bern 04, Sch 04, Wan 91].

Tafel 2-2: Physikalische Eigenschaften einiger Kationen

Kation	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$
Hydratradius in Å [Lud 74]	2,72	2,17	1,75
Ionenradius in Å [Hol 85]	0,99	0,97	1,33
Ladungsdichte <sup>1)</sup> in $\text{C}/\text{nm}^3$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,13 \cdot 10^{-3}$
1) Die Ladungsdichte wurde als Ladung pro Volumeneinheit berechnet, wobei als Volumen eine Kugel mit dem Ionenradius des entsprechenden Kations angesetzt wurde.			

Darüber hinaus wird auf Grund verschiedenster Untersuchungen und Beobachtungen angenommen, dass  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen die Alkaliionen im ASH substituieren können [Lud 74, Pow 55, Pow 55a, Spr 98, Wan 91]. Dies hat zur Folge, dass die freigesetzten Alkaliionen zusammen mit den gelösten Hydroxidionen des CH die gestörte Kieselsäurestruktur erneut angreifen und lösen können. Der Auflösungsprozess bei einer AKR wird dadurch ggf. forciert [Wan 91].

#### 2.1.4.3 Schädigungsmechanismus

Wie bereits aus Bild 2-2 hervorgeht, ist die Schädigung eines Betons infolge einer AKR der eigentlichen Reaktion nachgelagert. Ursache dafür ist, dass nicht die eigentliche Reaktion sondern die spezifische Eigenschaft des während einer AKR gebildeten ASHs, Wasser anzuziehen und in seine Struktur einzubauen, für die Schädigung verantwortlich ist [Gil 73]. Die Neigung des Wassers, zum während der AKR gebildeten ASH zu wandern, ist dabei auf ein niedrigeres chemisches Potential des Wassers im ASH gegenüber dem in der Porenlösung zurückzuführen [Lud 74, Pow 55, Str 79].

Basierend auf NMR-Untersuchungen, die eine Schichtstruktur der ASH aufzeigten [Con 93], wurde der Einbau von Wasser in Kanemit, einem alkalihaltigen Schichtsilikat, als Ursache für ein verringertes chemisches Potential angenommen [Man 01, Wie 00, Wie 96]. Jüngste Ergebnisse zeigten jedoch [Kir 05], dass Kanemit strukturell und energetisch nur ein begrenztes Potential hat, Wasser einzubinden und betonschädigende Quelldrücke aufzubauen. In [Pre 97, Rod 01, Rod 99] wurde die Theorie der elektrochemischen Doppelschicht auf die Reaktionsprodukte einer AKR angewendet. Danach bilden sich bei einer AKR gleichsinnig geladene kolloide Einheiten, deren Ladung vom Alkaligehalt abhängig ist. Auf Grund der resultierenden Abstoßungskräfte untereinander liegt ein hohes elektro-chemisches Potential im ASH vor, das durch den Einbau von Wasser abgebaut werden kann. Der Abstand zwischen den Einheiten wird vergrößert, die Abstoßungskräfte untereinander nehmen ab und das Gesamtpotential wird kleiner [Lud 74, Pre 97]. Die Theorie wird bestätigt durch Beobachtungen in [Cog 04, Hou 04, Str 87; Viv 50]. Danach nehmen alkalireiche ASH schneller und mehr Wasser auf als alkaliarmer ASH.

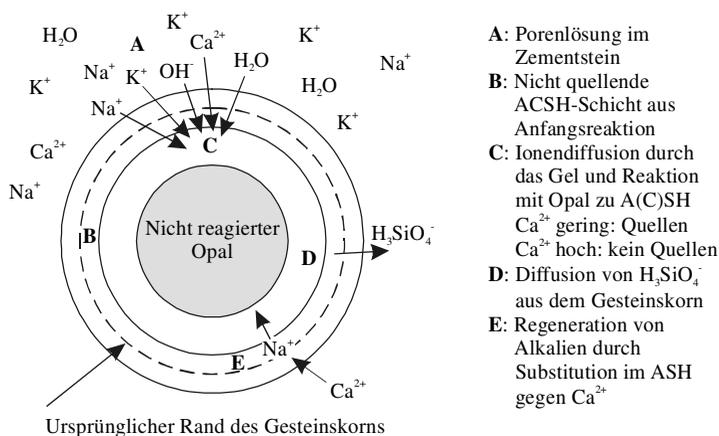


Bild 2-5: Modell nach Powers und Steinour zur AKR mit Opal [Hel 93]

Der unidirektionale Transport von Wasser aus der Porenlösung in das ASH ist eine notwendige Voraussetzung für das Auftreten eines osmotischen Drucks, der für eine schädigende AKR als Ursache für die Gefügeschäden angenommen wird [Man 06]. Dabei agiert das Wasser als Lösungsmittel und das ASH als Lösung. Die zweite Voraussetzung ist, dass Moleküle des ASH nicht in der Lage sind, aus dem ASH zu entweichen. Sind beide Voraussetzungen erfüllt, steht dem „Strömungsdruck“ des Wassers ein zunehmender „Fülldruck“, der osmotische Druck, entgegen, der auch als hydraulischer Druck oder Quelldruck bezeichnet wird [Hol 85, Pow 55, Pow 55a]. Der osmotische Druck wirkt auf die Umgebung. Im Falle einer AKR führt er, abhängig von der Art der alkali-

empfindlichen Gesteinskörnung, zu Zugspannungen im Gesteinskorn oder im umgebenden Zementstein. Überschreiten die Zugspannungen die Zugfestigkeit, kommt es zur Ausbildung von Rissen im Gefüge. Dabei kommt es an prismatischen Probekörpern sprunghaft zu messbaren Längenänderungen [Len 81].

In welcher Art und Weise die zweite Voraussetzung bei einer schädigenden AKR erfüllt wird, ist bisher nicht abgeschlossen geklärt. Auf Basis von Untersuchungen mit Opal und/oder Flinten gehen zahlreiche Forscher von der Ausbildung einer semipermeablen Membran aus. Dabei wird einem dichten Reaktionssaum aus CSH und ACSH-Phasen um eine alkaliempfindliche Gesteinskörnung diese Rolle zugewiesen [Ido 97, Pow 55, Pow 55a, Spr 98, StaJ 01]. Das in der Porenlösung gelöste  $\text{Ca}^{2+}$  des CH ist dabei entscheidend. Nach der in Bild 2-5 dargestellten Modellvorstellung übernimmt es drei Funktionen.

1. Es bindet in einer Anfangsreaktion gelöste Kieselsäure und bildet einen äußeren nicht quellenden Reaktionssaum (semipermeable Membran).
2. In Abhängigkeit von seiner Konzentration in der Porenlösung entscheidet es über die Bildung von quellfähigem oder stabilem Reaktionsprodukt bei einer AKR.
3. Es führt zu der bereits dargestellten Regeneration von Alkalien durch eine Substitutionsreaktion (siehe Abschnitt 2.1.4.2).

Darüber hinaus lässt sich daraus unmittelbar ableiten, dass die nicht quellfähigen CSH- und ACSH-Phasen Raum einnehmen, der für ggf. quellendes ASH im Innern des Gesteinskorns nicht mehr als Verdrängungsraum zur Verfügung steht.

In dem dargestellten Modell erfüllt der Austritt von Silicationen aus dem Innern des Gesteinskorns die Voraussetzungen für das Auftreten von osmotischem Druck nicht ganz. Eine weitere Modellvorstellung schließt diese Lücke [Kro 75, Viv 50]. Danach ist gebildetes ASH auf Grund der zunächst „trockenen“ Umgebungsbedingungen nicht in der Lage, sich in den Porenraum der Gesteinskörnung oder des umgebenden Zementsteins zu bewegen, um dort Wasser aufzunehmen. Das Wasser strömt daher auf Grund des beschriebenen Potentialunterschiedes zum hochviskosen ASH im Innern und wird in dessen Struktur eingebaut. Die damit verbundene Volumenzunahme wird durch das umliegende Gefüge behindert und es kommt zum Aufbau eines osmotischen Drucks. Mit diesem Modell lassen sich auch Gefügeschäden infolge einer AKR erklären, bei denen keine Reaktionssäume auftreten. Dies trifft insbesondere auf dichte Gesteinskörnungen wie Grauwacke und kataklastische Gesteinskörnungen sowie dem als Referenz häufig eingesetzten Duranglas zu [Jens 93, Spr 98].

#### 2.1.4.4 Rissausbildung in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung

In den meisten Grundlagenuntersuchungen wurden Gesteinskörnungen verwendet, die eine so genannte klassische AKR eingehen. Bei dieser Form der AKR wird viel ASH gebildet. Opal, Opalsandstein und poröse Flinte gehören zu dieser Gruppe. Eine schnelle und gleichmäßige Verteilung der Porenlösung und damit der Alkalihydroxide führt nach [Gla 81] dazu, dass zunächst die gesamte Kieselsäurestruktur zerstört wird und nachfolgend in Abhängigkeit der Zusammensetzung des ASH der Quellprozess einsetzt (linker Teil in Bild 2-6). Außerdem ist für die klassische AKR die Ausbildung des im zuvor genannten Bild erkennbaren Reaktionssaums typisch.

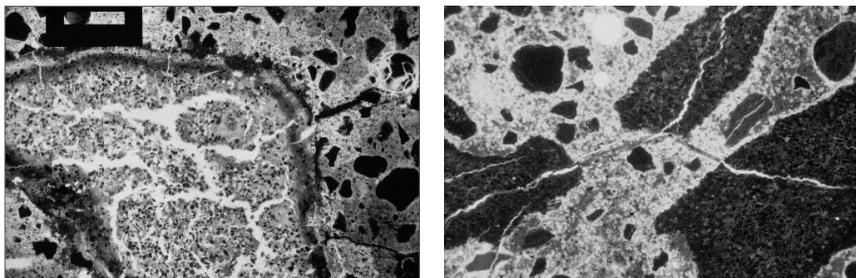


Bild 2-6: Beispiele einer AKR [Spr 98]:  
links: Poröser Opalsandstein mit Reaktionssaum - klassische AKR  
rechts: dichte Grauwacke

Die klassische AKR setzt eine Gesteinskörnung mit sehr großem Anteil reaktiver Kieselsäure voraus. Der Großteil der alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen besteht jedoch aus Konglomeraten von Mineralien verschiedener Zusammensetzung und weist zudem i.d.R. eine signifikant höhere Dichte als die Gesteinskörnungen der klassischen AKR auf. Alkaliempfindliche Kieselsäure tritt in solchen Gesteinskörnungen auf einen kleinen Bereich beschränkt und/oder unregelmäßig verteilt als Bindemittel zwischen Substrukturen auf [Jens 93]. Außerdem können durch den Angriff der sehr basischen Porenlösung Minerale wie Chlorit und Smektit zersetzt und reaktive Kieselsäure freigesetzt werden. In Abhängigkeit der zusätzlich in der Lösung vorhandenen Ionen kann es dann zu einer Schädigung infolge einer AKR kommen [Gil 73, Hil 05, Hün 06].

Das Rissbildet bildet sich bei diesen Gesteinskörnungen in Abhängigkeit vom Ort der reaktiven Kieselsäure und den Gefügeeigenschaften aus [Jens 93, Spr 98, Wil 94]. Der rechte Teil in Bild 2-6 und Bild 2-7 zeigen dies anhand einer mikroskopischen Aufnahme sowie anhand von Handskizzen mikroskopischer Beobachtungen. Bei künstlichen Gläsern treten Risse ebenfalls vorrangig entlang von Störzonen auf. Das wird auf den Herstellprozess und/oder auf das Brechen des Glases vor Herstellung der Mörtel/Betone zurückgeführt [Spr 98]. An der

Oberfläche aller zuvor genannten Gesteinskörnungen dieses Absatzes sind i.d.R. keine Auflösungserscheinungen oder Reaktionssäume zu erkennen.

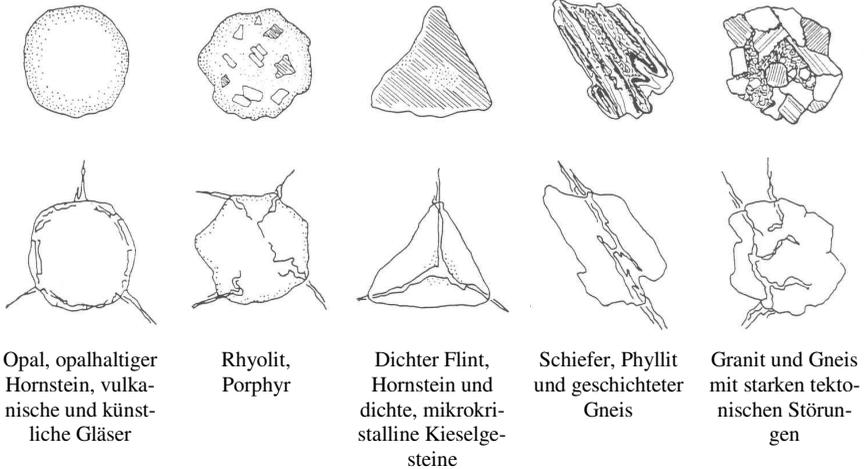


Bild 2-7: Rissbildung in Abhängigkeit vom Ort der reaktiven Kieselsäure und von der Gefügestruktur der Gesteinskörnung [Ido 92]

Insgesamt lässt sich aus den Beobachtungen ableiten, dass bei der klassischen AKR der Druck auf den umgebenden Zementstein und bei einer AKR mit einer dichten Gesteinskörnung auf das Gefüge des Gesteinskorns selbst ausgeübt wird [Spr 98]. Daraus folgt, dass im ersten Fall eher die Zugfestigkeit der Zementsteinmatrix und im zweiten Fall die Zugfestigkeit der Gesteinskörnung maßgeblich für die Rissentwicklung ist.

## 2.1.5 Modellsysteme

### 2.1.5.1 Borsilicatglas zur Simulation der Gesteinskörnung

Natürliche Gesteinskörnungen weisen eine gewisse Schwankung im Hinblick auf ihre Alkaliempfindlichkeit auf. Um diesbezüglich möglichst vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten, werden in Laboruntersuchungen z.T. industriell hergestellte Borsilicatgläser verwendet (Duranglas® oder Pyrexglas®) [ACI 98, Loc 00, Spr 98]. Als Begründung wird dafür ein gegenüber Opal oder Opalsandstein deutlich breiteres Pessimum (siehe Abschnitt 2.2.1.2) angeführt, so dass sich Schwankungen in der Zugabemenge weniger auswirken [Loc 00]. Weiterhin enthält es im Vergleich zu normalem Glas nur einen relativ geringen Natriumanteil von etwa 4 M.-%, so dass ein signifikantes Quellen ohne weitere

Alkalizufuhr über die Porenlösung bis zum Alter von einem Jahr unwahrscheinlich ist [Pik 60].

### 2.1.5.2 Wasserglas zur Simulation des Reaktionsprodukts einer AKR

Während einer AKR werden i.d.R. nur geringe Mengen an ASH gebildet. Darüber hinaus lassen sich ausreichende Mengen für umfassende Studien zu den Eigenschaften des ASH nicht aus dem Beton separieren. Deshalb ist für derartige Untersuchungen eine Modells substanz erforderlich.

Wasserglas wurde dazu bereits in einigen Untersuchungen eingesetzt [Kro 75, Str 79, VDZ 75, Viv 50]. Es kann auf verschiedenen Wegen produziert werden. Üblicherweise wird Quarzsand mit Soda oder Pottasche bei ca. 1300 °C verschmolzen, anschließend abgekühlt, wobei das Glas in Stücke zerspringt, und durch Wasserzugabe verflüssigt [Cog 04]. Beim Auflöseverfahren nach Kuhlmann, Liebig und Capitaine sowie im Hydrothermalverfahren nach Henkel (Autoklav) wird amorphe Kieselsäure direkt mit starker Natron- bzw. Kalilauge versetzt und so direkt Wasserglas produziert [Kuh 98, May 39]. In diesen Verfahren reagieren die Alkalihydroxide wie bei einer AKR mit der Kieselsäure zu Alkalisilikathydraten (ASH). Das Verhalten der Wassergläser sollte demnach mit dem des Reaktionsprodukts einer AKR im Beton übereinstimmen. Bezüglich der Eigenschaften der industriell hergestellten Wassergläser wird in der Literatur nicht zwischen den Herstellverfahren unterschieden [Cog 04, Kuh 98, May 39, Vai 52]. Es kann daher angenommen werden, dass sich auch über eine Schmelze hergestelltes und nicht verflüssigtes Stückenwasserglas dazu eignet, frisch gebildetes, wasserarmes ASH im Beton zu simulieren.

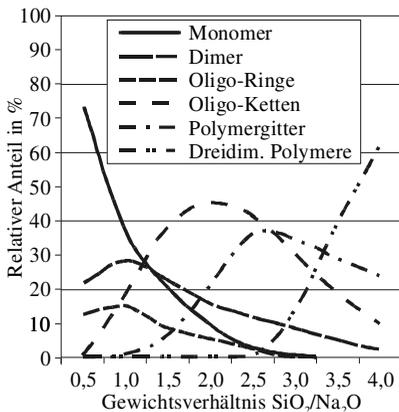


Bild 2-8: Ausbildungsformen der Kieselsäure in einer stabilen Alkalisilicatlösung mit konstantem Feststoffgehalt [Cog 05]

Während der Auflösungsverfahren wird durch die Alkalihydroxide die Kieselsäurestruktur angegriffen und bis zu einem gewissen Grad zersetzt (siehe Abschnitt 2.1.4.2). Der sich letztendlich einstellende Zersetzungsgrad hängt vom Gewichtsverhältnis der Kieselsäure zu den Alkalien ( $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ ) sowie von der Konzentration der Silicatlösung ab [Cog 04]. Bild 2-8 verdeutlicht dies für eine bestimmte Feststoffkonzentration einer Silicatlösung. Mit steigendem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  treten, ausgehend von vorrangig monomeren bis dimeren Molekülen, zunehmend höhermolekulare Silicate wie Ketten-, Gitter- oder Schichtstrukturen auf. Ab einem molaren Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  von 2,5 werden auch dreidimensionale Polymere beobachtet. Die Darstellungen gelten analog auch für eine ansteigende Feststoffkonzentration bei konstantem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ .

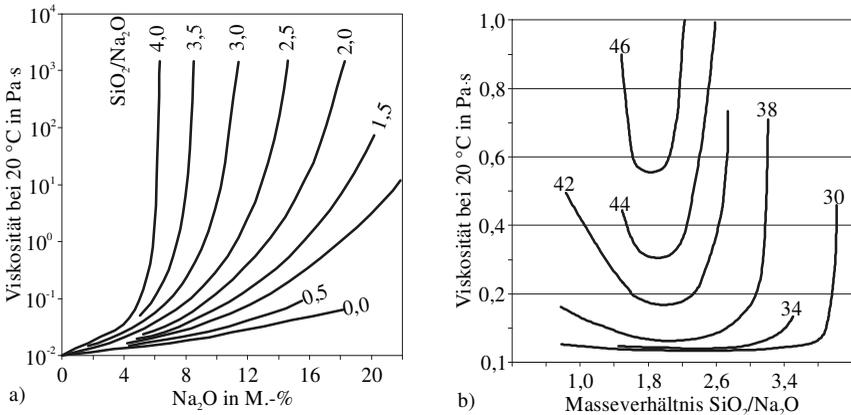


Bild 2-9: Viskosität von Alkalisilicatlösungen in Abhängigkeit von  
a) der Feststoffkonzentration aus  $\text{Na}_2\text{O} + \text{SiO}_2$  in der Lösung  
b) dem Masseverhältnis  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  bei unterschiedlichen Feststoffgehalten [Vai 52]

Die geschilderten strukturellen Zusammenhänge wirken sich unmittelbar auf die wichtigste Eigenschaft der Wassergläser, der Viskosität, aus. Der linke Teil von Bild 2-9 zeigt, dass bei insgesamt sehr stark mit der Feststoffkonzentration ansteigender Viskosität (logarithmischer Maßstab) die alkalärmeren Wassergläser einen besonders schnell ansteigenden Verformungswiderstand aufweisen. Im rechten Teil des Bildes ist dargestellt, wie – von rechts nach links betrachtet – bei konstantem Feststoffgehalt mit fallendem Kieselsäureanteil zunächst die Viskosität deutlich abfällt, ein Minimum bei einem Masseverhältnis von  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  von etwa 2 durchläuft und anschließend wieder stark ansteigt. Der Abfall ist durch eine zunehmende Anzahl an niedermolekularen Struktureinheiten begründet, während der Anstieg durch elektrostatische oder sterische Wechselwirkungen zwischen den immer alkalireicheren Silicathydraten bedingt ist [Boh 05]. Insgesamt wird deutlich, dass bereits geringe Änderungen der Zu-

sammensetzung große Auswirkungen auf die Viskosität von Wasserglas respektive ASH haben.

Verhältnisse  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  bzw.  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  kleiner 2 im Reaktionsprodukt einer AKR sind auf Grund zahlreicher Analysen unwahrscheinlich [Brou 93, Ido 61, Jak 93, Kro 75, Reg 89]. Eine ggf. auftretende Versteifung des Reaktionsprodukts infolge elektrostatischer oder sterischer Wechselwirkungen kann daher für die Betrachtung einer AKR vernachlässigt werden.

Neben der Zusammensetzung und dem daraus resultierenden inneren Aufbau bestimmt die Temperatur die Viskosität von Alkalisilicatlösungen. Die in Bild 2-10 dargestellten Abhängigkeiten zeigen auf, dass die Viskosität einer feststoffreicheren Alkalisilicatlösung bei steigender Temperatur deutlich stärker abfällt als die einer feststoffärmeren Lösung. Dabei ist zu beachten, dass eine ansteigende Dichte gleichbedeutend mit einem höheren Feststoffgehalt ist. Darüber hinaus ist auch die Viskosität kieselsäurereicher Wassergläser mit einem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  größer 3,5 stark von der Temperatur abhängig [May 39].

Bei höheren Temperaturen wurden wiederum geringere Viskositäten beobachtet. Ferner wird anhand des linken Bildteiles deutlich, dass Wassergläser, die bei 20 °C signifikante Unterschiede aufweisen, bei höheren Temperaturen ähnliche Viskositätskennwerte haben, d.h., dass das Fließverhalten der Wassergläser zunehmend unabhängig von deren Zusammensetzung wird.

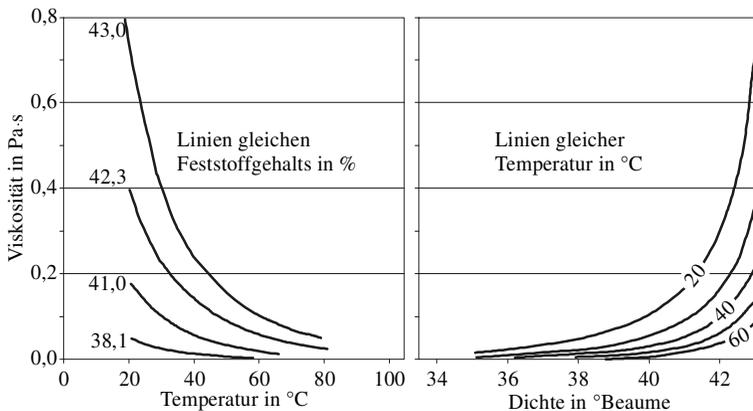


Bild 2-10: Viskosität einer Alkalisilicatlösung mit einem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  von 3,3  
links: in Abhängigkeit von Temperatur und Feststoffgehalt  
rechts: in Abhängigkeit von Dichte und Temperatur [Vai 52]

Zum Verhalten von Wasserglas im Hinblick auf die für eine schädigende AKR maßgebliche Wasseraufnahme durch das ASH ist bekannt, dass das Volumen der Wassergläser linear mit der Wasseraufnahme ansteigt [Kro 75]. Des Weiteren nehmen Wassergläser mit großem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  langsamer Wasser

auf [Viv 50] und geben es bei Erwärmung schneller wieder ab (Hysterese) [Cog 04]. Für die vollständige Trocknung ist eine Temperatur von 400 °C erforderlich.

## 2.2 Einflüsse auf eine schädigende AKR

### 2.2.1 Gesteinskörnung

#### 2.2.1.1 Reaktivität

Ein Unterschied in der Reaktivität der Gesteinskörnung äußert sich vor allem in der Geschwindigkeit, mit der eine Schädigung auftritt. Besonders stark ausgeprägt sind die Unterschiede zwischen Gesteinskörnungen der klassischen AKR und den so genannten langsam oder spät reagierenden Gesteinskörnungen (slow/late expansive aggregates), die gegenüber erst genannten deutlich gefügedichter sind. Während es in der Praxis bei einer klassischen AKR, wie z.B. in [Bon 73, Böd 03, Ido 92] dargestellt, bereits nach sehr kurzen Zeiträumen von ein bis zwei Jahren zu Schäden kommen kann, treten Schäden mit langsam bzw. spät reagierenden Gesteinskörnungen häufig erst nach 10 bis 20 Jahren auf [Ido 92, Jens 93, Sie 97a]. In Laborversuchen zeigt sich dieser Unterschied ebenfalls [VDZ 02]. Während ein Beton, der Opalsandstein und Flint enthält, bereits nach einem Monat Risse und erhöhte Dehnungen in einer 40 °C-Nebelkammer aufweisen kann, zeigt der Beton mit Grauwacke erst nach ca. vier Monaten Anzeichen einer Schädigung (siehe Bild 2-11).

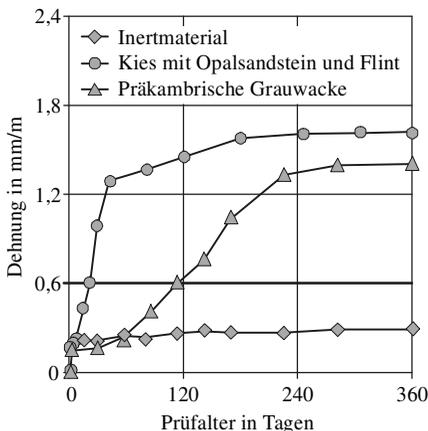


Bild 2-11: Reaktivität von Gesteinskörnungen, geprüft in einem Beton mit einem CEM I 32,5 R (1,3 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$ ), der in einer 40°C-Nebelkammer gelagert wurde

### 2.2.1.2 Anteil am Korngemisch (Pessimum)

Bei Verwendung von Gesteinskörnungen, die eine klassische AKR eingehen, wurde bereits sehr früh das sogenannte Pessimum festgestellt [Sta 42, Viv 50]. Es beschreibt das in Bild 2-12 für verschiedene Betone dargestellte Verhalten, wonach bei einem bestimmten Anteil einer Gesteinskörnung am Korngemisch die größten Schäden auftreten. Ist der Anteil kleiner oder größer, ist die Schädigung des Betons weniger ausgeprägt. Dies Verhalten wird zurückgeführt auf nur ein paar reagierte Gesteinskörner, die nicht zu einer signifikanten Gefügeschädigung ausreichen (links des Pessimums), sowie auf eine im Verhältnis zum wirksamen Alkaligehalt zu große Menge reaktiver Kieselsäure, die ein unzureichend quellfähiges ASH zur Folge hat (rechts des Pessimums) [Kro 75].

Das beschriebene Phänomen tritt sowohl bei Mörtel als auch bei Beton auf, jedoch sind die pessimalen Anteile bei Mörtel und Beton auf Grund der unterschiedlichen Korngrößen verschieden [Loc 75]. In Deutschland weisen der norddeutsche Kies mit Opalsandstein und Flint [Bon 73, Loc 75] sowie Duranglas [Spr 97] diese Eigenschaft auf. Im Beton liegt das Pessimum für den norddeutschen Kies erfahrungsgemäß bei einem 10 bis 30 %igen Anteil der Fraktion 2/8 mm am gesamten Korngemisch. Die genaue Lage ist, wie aus Bild 2-12 hervorgeht, von weiteren Faktoren wie dem Zementgehalt und dem Alkaligehalt des Zements abhängig. Es verschiebt sich bei kleineren Zement- bzw. Alkaligehalten hin zu einem geringeren pessimalen Anteil der Gesteinskörnung am gesamten Korngemisch [Bon 73].

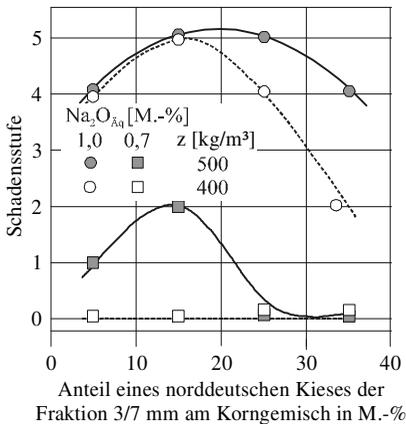


Bild 2-12: Einfluss des Anteils eines norddeutschen Kieses am Korngemisch auf die Betonschädigung in Anlehnung an [Bon 73] (0 = keine Risse; 5 = sehr starke Rissbildung auf allen Flächen)

Bei langsam bzw. spät reagierenden Gesteinskörnungen wurde ein Pessimum bisher nicht festgestellt. Der Schädigungsgrad steigt bei diesen Gesteinskörnungen proportional zum Anteil der alkaliempfindlichen Bestandteile an [Bok 02, Ido 97, Jens 93, Sie 97]. Allerdings ist eine bestimmte Mindestmenge an alkaliempfindlichem Material erforderlich, um eine Schädigung hervorzurufen. Bei

einem Großteil der alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen ist ab einem Anteil der alkaliempfindlichen Gesteinskörner am Korngemisch von ca. 15 M.-% mit Schäden zu rechnen [Wig 95].

### 2.2.1.3 *Bruchflächigkeit*

Quarz ist die stabilste Form der Kieselsäure. Alkaliempfindliche Kieselsäure ist demgegenüber in seiner Struktur i.d.R. verändert (krypto- oder mikrokristallin, amorph) und stellt folglich gegenüber dem Quarz eine Schwachstelle dar. Alkaliempfindliche Gesteinskörnungen brechen bevorzugt an diesen Stellen, so dass die alkaliempfindlichen Bestandteile freigelegt werden. Gebrochene natürliche Gesteinskörnungen können daher empfindlicher hinsichtlich einer AKR reagieren als ungebrochene [StaJ 06a]. Dieser Einfluss ist für einige Gesteinskörnungen in Regelwerken berücksichtigt worden [Luc 89, Deu 99, Deu 07].

### 2.2.1.4 *Porosität*

Für Gesteinskörnungen der klassischen AKR wurde ein Einfluss ihrer Porosität beobachtet [Aue 01, Loc 73]. Ist sie hoch, steht für das quellende ASH ein entsprechender Ausweichraum zur Verfügung, und es wird kein oder verspätet ein schädigender Druck aufgebaut. Ist die Porosität dagegen gering, ist mit einer stärkeren Schädigung zu rechnen.

## 2.2.2 *Betonzusammensetzung*

### 2.2.2.1 *w/z-Wert*

Der Einfluss des w/z-Werts wurde bisher nur selten untersucht. Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich ableiten, dass bei Mörtel i.d.R. mit ansteigendem w/z-Wert die Gefügeschädigung zunimmt. In Einzelfällen nimmt jedoch das Schädigungsmaß nach einem optimalen Wert auch wieder ab [Len 81, Wig 95]. Für Beton wurde festgestellt, dass sich bei Verwendung norddeutschen Kiesel mit Opalsandstein und Flint bei hohen w/z-Werten eine größere Dehnung und ausgeprägtere Rissbildung einstellt [Bon 86]. Als Ursache wird vermutet, dass nur bei entsprechend hohem w/z-Wert ausreichend Wasser für stärkere Gefügeschäden an die Reaktionsorte gelangen kann [Sie 97]. Präkambri-sche Grauwacke oder Kies-Edelsplitt des Oberrheins führten zu einem abweichenden Verhalten. Bei einem w/z-Wert von etwa 0,45 wiesen Betonbalken, geprüft in einer 40 °C-Nebelkammer, die höchsten Dehnungen auf [Sie 97, Bok 02a]. Bei vergleichend hergestellten Würfeln mit einer Kantenlänge von 30 cm

wurde dagegen nahezu kein Unterschied festgestellt [Bok 02a]. Eine Erklärung liegt hierfür bisher nicht vor.

#### 2.2.2.2 *Alkaligehalt im Beton*

Mit dem Ziel, den Gesamtalkaligehalt im Beton zu finden, ab dem eine schädigende AKR im Beton einsetzt, liegen zahlreiche Untersuchungen vor. Dabei wurden entweder der Zementgehalt variiert [Nis 89, Hob 93], CEM I-Zement gleicher Festigkeitsklasse mit unterschiedlichen Alkaligehalten verwendet [Bok 02a, Sie 97] oder es wurden dem Anmachwasser lösliche Alkaliverbindungen, meist Alkalihydroxide [Nis 89] zugegeben. Aus diesen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass der Schädigungsgrad eines Betons, sobald ein bestimmter Grenzwert überschritten wird, mit dem Alkaligehalt im Beton anwächst, wenn langsam bzw. spät reagierende Gesteinskörnungen verwendet werden. Ein allgemeingültiger Grenzwert existiert nicht, und er lässt sich auf Grund der natürlichen Vielfalt der Gesteinskörnungen wahrscheinlich auch nicht angeben [Sie 97]. Dennoch versucht man, Klassen in Abhängigkeit der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung einzuführen, die über den Grenzwert, ab dem Schäden auftreten, definiert werden [Hob 92, Nis 89, Nix 04].

In Deutschland ist lediglich für Kies mit Opalsandstein und Flint ein derartiger Wert anerkannt. Er liegt bei  $3,0 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$  [Loc 73].

#### 2.2.2.3 *Luftgehalt*

Künstlich in den Beton eingeführte Luftporen können einerseits als Ausweichraum für quellende Reaktionsprodukte dienen. Andererseits können sie eine Rissausbreitung behindern [Lud 74], so dass eine Gefügeschädigung infolge einer AKR ggf. abgemindert wird. Mit den wenigen vorliegenden Untersuchungen konnte dies jedoch nicht eindeutig verifiziert werden [Bon 86].

### 2.2.3 *Umgebungsbedingungen*

#### 2.2.3.1 *Temperatur*

Sowohl Untersuchungen an Mörteln als auch Betonen weisen auf einen starken Einfluss der Temperatur auf eine Gefügeschädigung infolge einer AKR hin. Vor allem in Abhängigkeit der Gesteinskörnung kann die Einflussnahme jedoch sehr unterschiedlich ausfallen.

Bei Verwendung der eher porösen Gesteinskörnungen der klassischen AKR (Opal, Opalsandstein, Flint) im Mörtel wurde festgestellt, dass die Schädigungsrate bei erhöhter Temperatur anfänglich deutlich größer ist [Len 81, Ola 86]. Die Maximaldehnung über Wasser gelagerter Mörtelprismen mit diesen Gesteinskörnungen nahm dabei i.d.R. mit ansteigender Temperatur ab (siehe Bild 2-2) [Bar 83, Gra 89, Len 81]. Gleiches gilt für ausreichend lang gelagerten Beton [Hob 93, Bon 73, Bon 86]. An Mörtelprismen mit 5 % Opalsandstein der Korngruppe 0,09/0,2 mm wurde jedoch auch ein Maximum bei einer Temperatur von rd. 40 °C festgestellt [Loc 73]. Vergleichbares wurde beobachtet, wenn bei Verwendung dichter Gesteinskörnungen relativ hohe Enddehnungen erreicht werden. Die Maximaldehnung stellte sich hier bei 80 °C ein. Bei kleineren Maximaldehnungen jedoch verhielt sich die Maximaldehnung sowohl von Mörtel als auch von Betonprismen proportional zur Lagerungstemperatur [Obe 86, Sie 97]. Das ist genau gegenläufig zum Verhalten der Mörtel mit eher porösen Gesteinskörnungen.

Unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung tritt dagegen eine schädigende AKR an Beton- oder Mörtelprismen umso eher auf, je höher die Lagerungstemperatur ist [Bar 83, Hob 93, Sie 97]. Die Zeiträume bis zum Schädigungseintritt verhalten sich dabei für Beton, gelagert im Freien, bei konstant 20 °C sowie bei konstant 38 °C (40 °C) in etwa wie 7:4:1.

Bild 2-2 bestätigt dieses Verhältnis für Lagerungstemperaturen von 20 °C und 40 °C. Des Weiteren weist es auf die Ursache für das zuvor beschriebene Phänomen hin. Danach setzt die chemische Reaktion des Opals mit den Alkalien relativ unabhängig von der Temperatur (Reaktionsrate ist bei 40 °C auf Grund der besseren Löslichkeit der Kieselsäure höher) bereits sehr bald nach Herstellung der Mörtel ein. Gleiches kann für dichte Gesteinskörnungen angenommen werden, da auch bei diesen bereits wenige Stunden nach Herstellung von Mörtel oder Beton die Alkalihydroxide die reaktiven Bestandteile erreichen [Fre 04, Jens 93]. Die eigentliche chemische Reaktion beeinflusst demnach den Zeitpunkt des Schädigungseintritts eher weniger. Vielmehr zeichnet sich ab, dass die Wasseraufnahme des gebildeten Alkalisilicats stark von der Temperatur abhängt und damit den Schädigungseintritt bestimmt. Darüber hinaus wird die mit ansteigender Temperatur abfallende Viskosität des Alkalisilicats als Grund für die zum Teil mit steigender Temperatur abfallende Maximaldehnung angeführt [Kro 75, Viv 51]. Aber auch der zugunsten eines angestiegenen Anteils an  $\text{SO}_4^{2-}$ -Ionen – zunehmende Instabilität des Ettringit bei erhöhten Temperaturen und wirksamen Alkaligehalten [Bol 00, Syl 88] – abfallende OH<sup>-</sup>-Ionenanteil wird als Begründung genannt [Her 92]. Insgesamt sind die Ursachen für das vor allem in Abhängigkeit der Gesteinskörnung (porös gegenüber dicht) beobachtete gegenläufige Verhalten bei ansteigenden Temperaturen eher unklar. Die Ei-

genschaften und das Verhalten der Alkalisilicate scheinen jedoch von maßgeblicher Bedeutung zu sein.

### 2.2.3.2 *Relative Luftfeuchte im Beton*

An trocken gelagerten bzw. vor einer Befeuchtung geschützten Betonen ist bisher keine schädigende AKR festgestellt worden [Bon 73, VDZ 02]. Demgegenüber sind der Hauptwindrichtung zugewandte (Schlagregen) sowie einer Feuchtigkeitszufuhr ausgesetzte Bauteile von Betonbauwerken mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen i.d.R. stärker von einer Gefügeschädigung infolge AKR betroffen [Jens 00, Put 85].

Eine ausreichende Feuchte ist für die chemische Reaktion bei einer AKR als Transportmedium für die Alkalihydroxide zum Reaktionsort notwendig. Für eine AKR mit Opalsandstein wurde festgestellt, dass selbst bei relativen Luftfeuchten von 60 % eine AKR abläuft, es jedoch zu keiner Schädigung kommt. Der Schädigungsgrad ist jedoch umso größer, sobald die Prismen im Anschluss höheren relativen Luftfeuchten ausgesetzt werden [Len 81, Viv 47]. Ferner kommt eine schädigende AKR zum Erliegen, wenn eine ausreichende Feuchtezufuhr nicht mehr gewährleistet ist, und setzt sich wieder fort, sobald sie wieder eintritt [Lar 00, Put 85]. Insgesamt weisen die Beobachtungen darauf hin, dass die Feuchte eher für den Schädigungsmechanismus (Aufbau des osmotischen Drucks) als für die chemische Reaktion von Bedeutung ist.

Wie in Abschnitt 2.1.4.3 dargestellt, wird die Neigung des Wassers, zum neu gebildeten Alkalisilicat zu wandern, auf ein niedrigeres chemisches Potential im Alkalisilicat zurückgeführt. Ein energetisch ungünstigerer Zustand des Wassers stellt sich durch einen im Vergleich höheren Wasserdampfpartialdruck und eine sich darüber einstellende höhere relative Luftfeuchte dar [Viv 50]. Daraus lässt sich ableiten, dass das Quellen des ASH zum Erliegen kommt, wenn der Wasserdampfpartialdruck in der Zementsteinmatrix gleich oder geringer ist als am Ort des ASH. Somit ist die relative Luftfeuchte im Beton die maßgebliche zu betrachtende Größe.

Nach Bild 2-13 liegt für bei 23 °C gelagerte Mörtelprismen mit Opal die für das Auftreten einer schädigenden AKR kritische relative Luftfeuchte bei 80 % [Stad 91]. Bei einer Lagerungstemperatur von 38 °C wurde ein kritischer Wert von 73 % relativer Luftfeuchte bestimmt [Ola 86]. Das bedeutet, Temperatur und relative Luftfeuchte beeinflussen einander im Hinblick auf das Auftreten einer schädigenden AKR. Die kritische relative Luftfeuchte ist umso geringer, je höher die Temperatur ist.

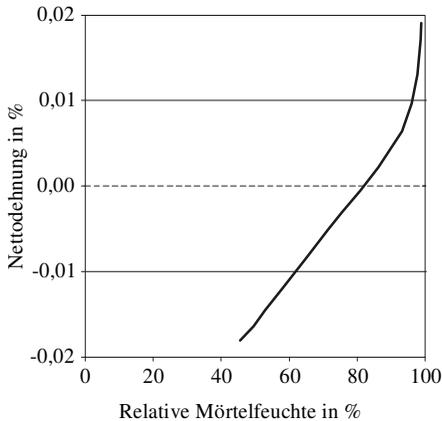


Bild 2-13: Nettodehnung ( $\epsilon_{\text{reaktiv}} - \epsilon_{\text{inert}}$ ) von Mörtelprismen in Abhängigkeit von deren relativer Feuchte [StaD 91]

Über die Abhängigkeit der Schädigung von der relativen Luftfeuchte oberhalb der kritischen relativen Luftfeuchte liegen keine einheitlichen Erkenntnisse vor. In einigen Fällen zeigte sich ein stetig mit der relativen Luftfeuchte ansteigender Zusammenhang [StaD 91, Ola 86]. Andere Untersuchungen zeigen, dass bei relativen Luftfeuchten  $> 95\%$  bzw. Wasserlagerung die Enddehnung von Prismen wieder abnimmt [Nil 83, Viv 47, Wie 99]. Als Ursache dafür wurde eine infolge großer Wasseraufnahme geringe Viskosität des Alkalisilicats genannt.

### 2.2.3.3 Alkalizufuhr von außen

Während bei Laborprüfungen Probekörper in alkalihaltigen Lösungen gelagert werden (siehe Abschnitt 2.3), kann, wie bereits in Abschnitt 0 angemerkt, Beton in der Praxis durch Meerwasser oder das Streuen von Verkehrsflächen mit Alkalien belastet sein.

Für Mörtelprismen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, die in unterschiedlich konzentrierten Natronlaugen gelagert wurden, zeigte sich, dass die 1,0 N Lösung zu der höchsten Dehnung führt [Obe 86, Viv 50]. Für das Streusalz eingesetzt NaCl deutet sich ein ähnliches Maximum für eine Lagerungstemperatur von  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei einer 2 N Lösung an (Bild 2-14 b)). Bei Kaliumchlorid hingegen wurde eine stetige ansteigende Maximaldehnung bis zu einer 3 N Konzentration festgestellt [Cha 87]. Außerdem zeigte sich in diesen Untersuchungen, dass das Ausmaß der Gefügeschädigung zusätzlich sehr stark vom jeweiligen Anion des zugegebenen Salzes abhängt (Bild 2-14 a)).

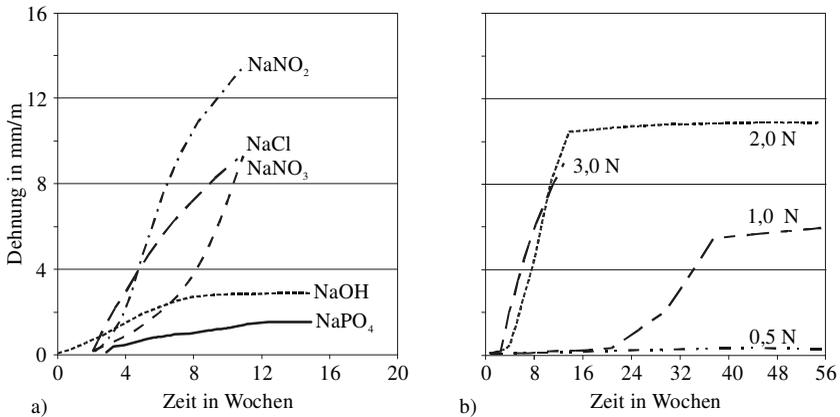


Bild 2-14: Dehnung von Mörtelprismen gelagert in  
a) 3 N Lösungen verschiedener Natriumsalze [Cha 87]  
b) NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentration [Cha 87]

Dies gilt auch für Beton. Natriumacetate und -formiate, die als Enteisungsmittel auf Flugbetriebsflächen eingesetzt werden, führen im Vergleich zu NaCl zu größeren Gefügeschäden [Dia 06, StaJ 06]. Zusätzlich ist das Auftreten einer AKR bei Alkalizufuhr von außen vom anfänglich im Beton enthaltenen Alkaligehalt abhängig. Bei niedrigen wirksamen Alkaligehalten (Verwendung von NA-Zement, Gesamtalkaligehalt im Beton  $< 3,0 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{Äq.}}$ ) und moderater Zufuhr an NaCl (bis 1 N), ist die Wahrscheinlichkeit für eine Gefügeschädigung infolge AKR eher gering. Enthält der Beton jedoch von vornherein höhere Alkaligehalte oder wird er bei niedrigem Alkaligehalt mit höher konzentrierter NaCl-Lösung beaufschlagt, ist mit einer schädigenden AKR zu rechnen [Ber 03, Davi 86, Sib 98]. Auf andere Natriumsalze oder Kaliumsalze sind diese Angaben nicht übertragbar.

Wie in Abschnitt 2.1.4.2 dargestellt, führt zwar die Erhöhung der Alkalikonzentration zu einer höheren Löslichkeit der Kieselsäure, verantwortlich für das Aufbrechen der Siloxanbindungen der Kieselsäure sind jedoch die OH-Ionen. Diese werden durch Wechselwirkungen der zugeführten Salze mit den im Zementstein enthaltenen Hydratphasen CH und  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  gebildet [Cha 87, Davi 86, Dia 06, Dro 92, Sib 98, StaJ 06]. Bei NaCl-Zufuhr wird Friedel'sches Salz ( $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaCl}_2\cdot\text{H}_{10}$ ) bzw.  $\text{CaCl}_2$  gebildet. Zum Ladungsausgleich wird das frei gewordene  $\text{Na}^+$ -Ion in der Lösung durch zeitgleich freigesetzte OH-Ionen abgesättigt. Bei Verwendung anderer Salze kann das Chlorid lückenlos durch Nitrat und Nitrit ersetzt werden. Eine gegenüber dem OH-Ion größere relative Bindungsneigung zum Ca führt dabei zur in Bild 2-14 a) dargestellten Verstärkung der Schäden [Dro 92]. Bei Verwendung von Acetaten und Formiaten werden selbige zunächst durch Sauerstoff zersetzt. Das dabei freigesetzte Carbonat

reagiert nachträglich wie zuvor das Chlorid und führt so zu einem verstärkten Angriff [Dia 06, StaJ 06].

Informationen zu möglichen Alkalikonzentrationen in der Praxis können [FGSV 97, StaJ 06] entnommen werden.

## **2.3 Auswirkung weiterer Hauptbestandteile im Zement**

### *2.3.1 Allgemeines zur Vermeidung einer AKR*

Eine schädigende AKR kann nicht auftreten, wenn eine der drei in Abschnitt 2.1.1 genannten Voraussetzungen für eine schädigende AKR nicht erfüllt ist. Dem entsprechend haben Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR i.d.R. zum Ziel, mindestens eine der notwendigen Voraussetzungen zu eliminieren. Aus bautechnischen sowie ökologischen und ökonomischen Gründen sind vorbeugende Maßnahmen im Hinblick auf eine ausreichende Feuchtigkeit und die kritische Menge an Gesteinskörnungen mit alkaliempfindlicher Kieselsäure im Beton nur eingeschränkt umsetzbar [ACI 98, Bok 02]. Deshalb wird zur Vermeidung einer schädigenden AKR überwiegend das Ziel verfolgt, die Menge an Alkalihydroxiden in der Porenlösung und somit den wirksamen Alkaligehalt auf ein unschädliches Maß zu begrenzen. Hierfür werden in nationalen Regelungen die folgenden drei Vorgehensweisen beschrieben [Nix 04].

1. Verwendung eines Zements mit einem Gesamtalkaligehalt  $\leq 0,60$  M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\ddot{a}q}$
2. Bilanzierung des Alkaligehalts im Beton
3. Einsatz von Hüttensand, Puzzolanen oder ähnlich wirkenden mineralischen Stoffen

Die erstgenannte und allgemein anerkannte Maßnahme geht zurück auf eine Beobachtung von Stanton aus dem Jahr 1940, nach der eine schädigende AKR praktisch nicht mehr eintritt, wenn der Gesamtalkaligehalt eines Portlandzements den genannten Grenzwert nicht übersteigt [Loc 73, Sta 40]. Sie ist einfach zu handhaben. Ein wesentlicher Nachteil ist jedoch, dass auf Grund hoher Alkaligehalte in den Roh- und Brennstoffen ein solcher Zement in vielen Regionen wirtschaftlich nicht hergestellt werden kann.

Für den effektiven Einsatz der Alkalibilanzierung im Beton muss der Grenzwert, ab dem mit der eingesetzten Gesteinskörnung keine schädigende AKR mehr auftritt, sowie der Beitrag aller im Beton eingesetzten Stoffe zum wirksamen Alkaligehalt bekannt sein. Der Grenzwert wurde bisher nur indirekt bestimmt und liegt bis auf wenige Ausnahmen [Hob 92] nur für sehr reaktive Gesteinskörnungen wie Opal vor. Eine daran orientierte Bemessung kann zu weit

auf der sicheren Seite liegenden Anforderungen führen [Tho 96a]. Darüber hinaus besteht keine Einigkeit darüber, in welchem Umfang die einzelnen Ausgangsstoffe zum wirksamen Alkaligehalt beitragen [CSA 00, Fou 00, Här 96, Hob 89, LCP 94]. Ferner wird an der Vorgehensweise kritisiert, dass die eingesetzten Prüfverfahren zur Bestimmung des Alkalibeitrags das Verhalten der Ausgangsstoffe im Beton falsch abbilden [Sch 04, Tho 96a].

Trotz der praktischen Umsetzung der zuvor diskutierten Maßnahmen in einigen Ländern (z.B. in [CSA 00, LCP 94, Deu 07]), führen die aufgeführten Nachteile und Unsicherheiten dazu, dass der Einsatz von Hüttensand, Puzzolanen oder ähnlich wirkenden mineralischen Stoffen, vor allem auch in Deutschland voran getrieben wird [Bok 01, Böh 06, Hei 05, Sch 04, Schm 06, Scho 06]. Das Augenmerk liegt dabei derzeit auf der Klärung der prinzipiellen, zur Vermeidung einer schädigenden AKR beitragenden Wechselwirkungen, um darauf aufbauend gezielt geeignete Zemente entwickeln zu können. In den folgenden Abschnitten beschränken sich die Betrachtungen auf Hüttensand sowie Flugasche und Silikastaub. Hüttensand wird als Hauptbestandteil im Zement in Deutschland bereits seit Jahren erfolgreich angewendet [Sie 01, Smo 74, Spr 73]. Silikastaub und insbesondere Flugasche stehen aktuell zur Diskussion [Hei 05, Sch 04, Schm 06, Scho 06, Sie 00].

### *2.3.2 Einfluss auf die Alkalität der Porenlösung*

#### *2.3.2.1 Allgemeines*

Die im Folgenden dargestellten Zusammenhänge beziehen sich im Wesentlichen auf Versuche an Zementleimen, die bei 20 °C unter konservierten Bedingungen gelagert wurden. Vergleichende Untersuchungen bei unterschiedlichen Temperaturen, die im Hinblick auf die Aufgabenstellung von besonderem Interesse sind, liegen bisher nicht vor.

#### *2.3.2.2 Hüttensand*

Wie im Portlandzementstein erreicht der Alkaligehalt der Porenlösung im hüttensandhaltigen Zementstein spätestens nach 28 d ein konstantes Niveau. Die Alkaliionenkonzentration wird abgemindert, jedoch fällt die Konzentrationsabnahme geringer aus als bei einer reinen Verdünnung des Portlandzements durch einen inerten Stoff. Entsprechend leistet Hüttensand einen Beitrag zum Alkaligehalt der Porenlösung. Dieser ist entgegen der Erwartung weitgehend unabhängig vom Alkaligehalt des Hüttensands [Sch 04]. Die Basizitätszahl des Hüttensands  $((C+A+M)/S)$  übt hier offenbar eine größere Wirkung aus (Bild 2-15). Ein größerer Wert führt dabei zu höheren Freisetzungsraten [Kol 86]. Bei einem

Hüttensandgehalt von ca. 20 M.-% ist es möglich, dass der Alkaligehalt der Porenlösung größer als der eines Zementsteins ausschließlich mit CEM I-Zement gleicher Klinkerbasis ist. Darüber hinaus stellen sich im Vergleich zum CEM I-Zement geringere Alkalikonzentrationen in der Porenlösung ein. Die Differenz wird dabei umso geringer, je mehr Hüttensand im Zement enthalten ist [Kol 86, Sch 04]. Dies gilt auch für Mörtel und Beton [Bok 02, Hob 89, Tho 96]. Die Hauptursache für den verringerten Alkaligehalt in der Porenlösung ist der mit steigendem Hüttensandgehalt geringere Klinkeranteil im System. Eine aktive Alkalibindung wird weitgehend ausgeschlossen [Sch 04].

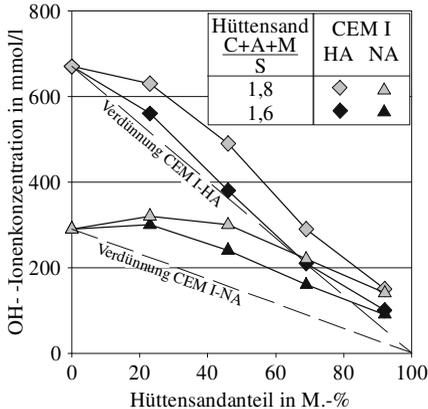


Bild 2-15: Einfluss von Hüttensanden mit unterschiedlicher Reaktivität (gleicher Alkaligehalt) kombiniert mit Portlandzementen verschiedenen Alkaligehalts (HA = hoher Alkaligehalt, NA = niedriger Alkaligehalt) auf die Alkalität der Porenlösung in 180 d altem Zementstein, w/z = 0,50; Daten aus [Kol 86]

### 2.3.2.3 Flugasche

Bei Flugaschen ist hinsichtlich der Wirkung auf die Porenlösungszusammensetzung zwischen calciumarmen und -reichen Flugaschen zu unterscheiden. Für calciumarme ( $\leq 10$  M.-% CaO), weniger reaktive Flugaschen gilt, dass bis zu einer Hydratationsdauer von 28 d die Wirkung der Flugasche mit der des Hüttensands vergleichbar ist. D.h., sie kann einen Beitrag zur Alkalikonzentration der Porenlösung leisten. Im weiteren Verlauf werden durch die bei der einsetzenden puzzolanischen Reaktion der Flugasche gebildeten Reaktionsprodukte Alkalien gebunden und so die Alkalikonzentration der Porenlösung sukzessiv reduziert. Nach etwa 180 d stellt sich ein konstantes Niveau ein, das deutlich unterhalb der Konzentration liegt, die infolge einer reinen Verdünnung zu erwarten wäre. Die Flugasche bindet somit bei der puzzolanischen Reaktion mehr Alkalien als sie selbst einbringt [Sch 04]. Das gilt wiederum auch für Mörtel und Beton [Schm 06, Tho 96].

Bei Verwendung calciumreicher Flugaschen dagegen kann die Alkalikonzentration in der Porenlösung deutlich über die bei Verwendung von CEM I-Zement hinaus ansteigen [Dia 81a, Kol 86, She 99]. Der Alkalibeitrag ist dabei i.d.R. proportional zum Alkaligehalt der Flugasche.

### 2.3.2.4 Silikastaub

Nach einem sehr kurzfristigen Alkalibeitrag des Silikastaubs wird bereits 1 bis 2 Tage nach Herstellung die Alkalikonzentration der Porenlösung in einem Zementstein sehr stark abgemindert (Bild 2-16). Das basiert auf der infolge eines sehr niedrigen C/S-Verhältnisses sehr hohen Bindungskapazität der CSH-Phasen des Silikastaubs und des ebenfalls daraus gebildeten ASHs. Ab einem bestimmten Zeitpunkt werden jedoch aus den Reaktionsprodukten Alkalien wieder freigesetzt. Der Zeitpunkt ist umso früher und die freigesetzte Menge umso größer, je kleiner der Anteil an Silikastaub im Zement ist (Bild 2-16). Ursache ist eine Substitutionsreaktion, bei der ausreichend vorliegendes Ca Alkalien im ASH ersetzt. Insgesamt überwiegt die alkalibindende Wirkung jedoch deutlich [Sch 04].

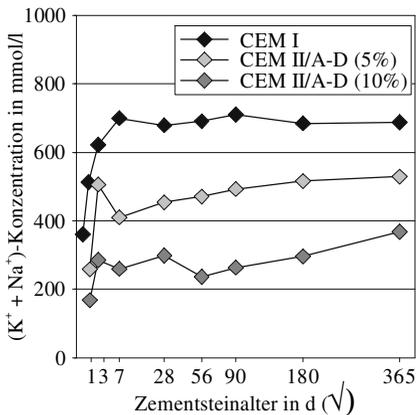


Bild 2-16: Einfluss des Silikastaubs auf die Alkaliionkonzentration der Porenlösung in Zementstein mit w/z = 0,50; Daten aus [Sch 04]

### 2.3.2.5 Bindungskapazität und -stabilität

In Untersuchungen sowohl an Beton als auch an Zementstein wurde festgestellt, dass die Bindungskapazität der durch Klinker, Hüttensand, Flugasche bzw. Silikastaub gebildeten Hydratations- und Reaktionsprodukte vom Alkaliangebot in der Porenlösung abhängt [Hob 94, Sch 04, Tho 96a]. Mit zunehmendem

Alkaliangebot steigt die Bindungskapazität an. Dies wirkt sich prinzipiell positiv im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden AKR aus. Umgekehrt kann es vorkommen, dass die Bindungskapazität soweit abfällt, dass selbst calciumarme Flugasche die durch sie freigesetzten Alkalien nicht wieder bindet und diese somit in Lösung als wirksame Alkalien zur Verfügung stehen [Hob 94].

Zusammengenommen verdeutlichen die Beobachtungen, dass es im zementgebundenen System abhängig vom Alkaligehalt einen Gleichgewichtszustand zwischen in Lösung befindlichen und an Reaktionsprodukten gebundenen oder adsorbierten Alkaliionen gibt [Sch 04]. Wird dieses Gleichgewicht gestört, verschieben sich die ursprünglichen Relationen. Ursachen, die zu derartigen Verschiebungen führen, können eine Auslaugung, z.B. während eines Elutionsversuchs, oder ein innerer Verbrauch von Alkalien, z.B. infolge einer AKR, sein [Hob 94, Sch 04].

### 2.3.3 *Einfluss auf weitere schädigungswirksame Parameter*

#### 2.3.3.1 *Ableitung der Parameter*

In den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 wurde hinsichtlich der Vermeidung einer schädigenden AKR ausschließlich auf die notwendigen Voraussetzungen für eine AKR Bezug genommen. Den Ausführungen in den Abschnitten 2.1.4 und 2.2.3 ist jedoch zu entnehmen, dass neben diesen weitere Faktoren einen maßgeblichen Einfluss auf eine schädigende AKR ausüben können. Auf die potentielle Einflussnahme von CH wurde bereits in Abschnitt 2.1.4.3 eingegangen. Sie kommt vor allem bei einer schädigenden AKR mit porösen Gesteinskörnungen zum Tragen, bei denen i.d.R. ein Großteil der betroffenen Gesteinskörner aus reaktiver Kieselsäure besteht.

Am Ort einer AKR werden der Porenlösung Alkalihydroxide entzogen und es entsteht ein Konzentrationsgefälle, das ausgeglichen wird. Über die Geschwindigkeit des dafür notwendigen Alkalihydroxidtransports und damit der AKR entscheidet der Diffusionswiderstand. Weiterhin ist während der Schädigungsphase eine ausreichende Nachlieferung von Wasser notwendig, um einen gefügeschädigenden osmotischen Druck aufzubauen. Sie wird durch die Permeabilität des Gefüges behindert, so dass diese maßgeblich über eine Schädigung mit entscheidet. Beide Widerstandsgrößen werden hauptsächlich durch die Gefügeausprägung bestimmt. Der transportwirksame Kapillaranteil sowie der Grenzradius des Porensystems sind dafür die beschreibenden Größen [Brod 82, Här 95, Hoh 03].

Durch den Einsatz von Hüttensand, Flugasche und Silikastaub wird im Vergleich zum Portlandzementbeton das Gefüge mehr oder weniger verändert. Eine

Beurteilung im Hinblick auf eine schädigende AKR ist bisher nur sehr eingeschränkt erfolgt. Um dennoch eine Vorstellung zu bekommen, sind in den folgenden Absätzen Erkenntnisse zu den genannten Einflussgrößen zusammengestellt.

### 2.3.3.2 Alkalidiffusion und Wasserpermeabilität

In direktem Bezug zu einer AKR ist die auf das Gefüge bezogene Wirkung von Hüttensand, Flugasche und Silikastaub lediglich qualitativ beschrieben worden [Hüttensand: Sim 92, Nix 87; Flugasche: Bly 98, Duc 94a, Tho 96a; Silikastaub: Sel 87, Wan 91]. Als Ursachen für eine Abminderung bzw. Vermeidung einer schädigenden AKR werden durch eine verfeinerte Porenstruktur und verdichtete Kontaktzone bedingte, behinderte Transportmechanismen (Diffusion, laminare Strömung) angeführt. Nur für Zement mit 75 M.-% Hüttensand wurde quantitativ angegeben, dass in Abhängigkeit von der Hydrationsdauer die Permeabilität für Wasser durch einen Mörtel 10 bis 100-fach kleiner ist als bei Verwendung von CEM I-Zement. Dies wurde auf die Ausbildung von undurchlässigen Membranen in den Poren zurückgeführt, die den für eine schädigende AKR notwendigen Wassertransport unterbinden [Bak 80]. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass im Zementstein ( $w/z = 0,60$ ) der Diffusionskoeffizient für  $\text{Na}^+$  auf 20 % des ursprünglichen Werts abfällt, wenn der Hüttensandanteil im Zement von 20 auf 40 M.-% erhöht wird [Brod 82, Uch 87]. Bei kleineren bzw. größeren Hüttensandanteilen ist der Koeffizient weitgehend konstant.

Aus (Bild 2-17) geht für die Verwendung von Flugasche hervor, dass der Diffusionskoeffizient für Alkalien mit zunehmendem Anteil stark abnimmt (28d Vorlagerung). Besonders ausgeprägt ist der Abfall bis zu einem Anteil von 20 M.-% bezogen auf Zement plus Flugasche [Hoh 03]. Die Wasserpermeabilität von flugaschehaltigem Mörtel lässt sich auf Grund des linearen Zusammenhangs zwischen Gasdiffusion und Gaspermeabilität [Grä 86] und einem konstanten Verhältnis von Gaspermeabilität zu Wasserpermeabilität [Loc 68] anhand der Untersuchungen zur Wasserstoffdiffusion in [Här 95] beurteilen. Sie zeigen, dass sich die Permeabilität von Mörteln bis zum Alter von 28d proportional zum Anteil der Flugasche verhält. Darüber hinaus stellt sich ein antiproportionales Verhältnis ein, wobei nach 91d der Diffusionskoeffizient bei 20 % bzw. 40 M.-% Flugasche auf die Hälfte bzw. ein Viertel des ursprünglichen Werts abfällt. Die beschriebene Zeitabhängigkeit wird in [Bery 87, Tho 96] prinzipiell bestätigt und ist auf die verzögert einsetzende Reaktion der Flugasche und damit verbundene Gefügeverdichtung zurückzuführen.

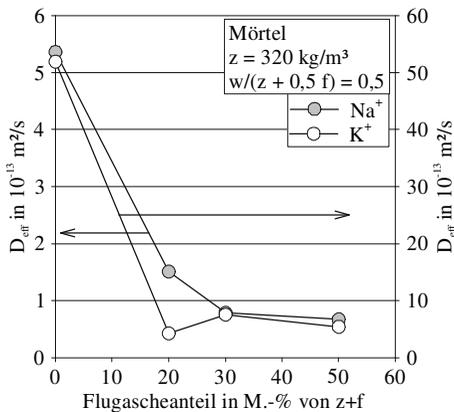


Bild 2-17: Effektive Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit vom Flugascheanteil; Daten aus [Hoh 03]

Beim Einsatz von Silikastaub verringert sich die Permeabilität von Beton bei vergleichbarer Betonfestigkeit nur geringfügig [Sel 87]. Ohne Berücksichtigung der Festigkeit nimmt sie jedoch in Abhängigkeit vom Silikastaubanteil sehr schnell und stark zu [Loc 00, Sel 87]. Bereits 5 M.-% Silikastaub führen zu einer 100- bis 300-fach kleineren Permeabilität gegenüber reinem Portlandzement [Lea 98, Sel 87]. Eine sehr starke Verfeinerung der Porenstruktur [Kön 99] kann hierfür als Ursache angenommen werden. Konkrete Zahlen zur Alkalidiffusion liegen nicht vor. Jedoch ist auf Grund der erhöhten Adsorptionsfähigkeit der Reaktionsprodukte Alkalien gegenüber von einem sehr deutlich erhöhten Diffusionswiderstand auszugehen.

Durch den Einsatz von Puzzolanen und Hüttensand werden Diffusion und Permeabilität somit dahingehend beeinflusst, dass die Transportbedingungen für Wasser und Alkaliionen zum Teil drastisch verringert werden. Es ist daher anzunehmen, dass eine schädigende AKR dadurch deutlich verlangsamt oder gar verhindert werden kann.

### 2.3.3.3 Calciumhydroxidgehalt in der Kontaktzone

Die Kontaktzone in einem CEM I-Beton ist im Vergleich zum Zementstein deutlich poröser (Bild 2-18). Darüber hinaus liegt in der Kontaktzone vermehrt CH vor – feinkristallin und weitgehend senkrecht zur Oberfläche der Gesteinskörnung in der Kontaktschicht sowie bankig und in großen Kristallen in der Zwischenschicht [Reh 77]. Damit steht in einem Beton mit CEM I-Zement in unmittelbarer Umgebung der Gesteinskörnung ausreichend CH zur Verfügung, um, wie beschrieben, auf eine AKR Einfluss nehmen zu können.

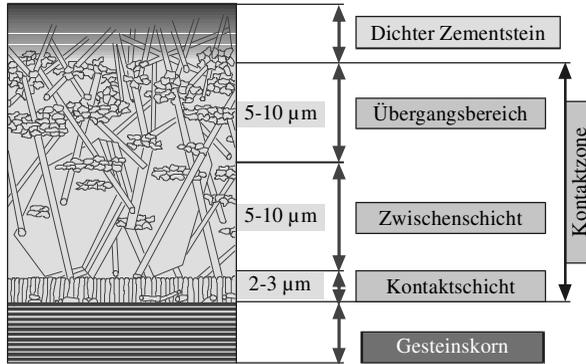


Bild 2-18: Aufbau der Kontaktzone in gewöhnlichem Beton [Reh 77]

Sowohl bei der puzzolanischen Reaktion von Flugaschen und Silikastaub als auch bei der latent-hydraulischen Reaktion von Hüttensand wird CH verbraucht. [Loc 00, Luk 88, Sch 04]. Obwohl der auf die eingesetzte Menge bezogene CH-Umsatz mit ansteigendem Anteil an Flugasche, Silikastaub oder Hüttensand abfällt, steigt die insgesamt umgesetzte Menge stetig an. In Abhängigkeit des eingesetzten Stoffs wirkt sie sich dabei unterschiedlich stark auf den CH-Anteil in der Kontaktzone aus.

Für Hüttensand wurde festgestellt, dass der CH-Anteil nach 7d beginnt abzunehmen und mit der Zeit deutlich unter das Niveau des CEM I-Zements abfällt [Det 86, Larb 93, Reh 77]. Zwischen- und Übergangsschicht werden dabei durch Reaktionsprodukte verdichtet, so dass eine bankige Ausfällung des CHs unterbunden wird. Obwohl Flugasche bei  $20\ ^\circ\text{C}$  erst nach rd. 28d zu reagieren beginnt, ist der CH-Anteil in der Kontaktzone durch den Füllereffekt (Feinanteil der Flugasche) bereits nach 7d signifikant reduziert [Larb 93]. Die puzzolanische Reaktion verdichtet das Gefüge und vermindert die Dicke der Kontaktschicht und den Anteil an CH weiter. Silikastaub verdichtet die Kontaktzone auf Grund des Füllereffekts und der früh einsetzenden Reaktion besonders schnell und ausgeprägt. Es liegt kein bankig ausgefallenes CH mehr vor, und der dichte Zementstein reicht bis an die Gesteinskörnung heran [Kön 99, Res 00, Sel 87].

In Bezug auf eine schädigende AKR vor allem mit porösen Gesteinskörnungen kann auf Grund der geringeren Verfügbarkeit an CH in der Kontaktzone davon ausgegangen werden, dass die Intensität einer Schädigung abnimmt, je größer der Anteil an Puzzolanen oder Hüttensand im Zementstein ist und je weiter die Reaktion fortgeschritten ist.

### 2.3.3.4 Einfluss der Lagerungstemperatur

Wie bei der AKR beeinflusst die Temperatur auch die Reaktionskinetik von Portlandzementklinker, Hüttensand und Puzzolanen. Für reinen Portlandzement ist bekannt, dass dessen Hydratationsfortschritt insbesondere bei niedrigen Hydratationsgraden, d.h. bis etwa 7d, durch die Temperatur beeinflusst wird [Lea 98, Loc 00]. Er ist umso höher, je höher die Lagerungstemperatur bis zu diesem Alter ist.

Bei Hüttensand macht sich der Einfluss der Temperatur vor allem im Alter bis zu einem Monat bemerkbar. Nach einem Jahr erreicht Hüttensand unabhängig von der Lagerungstemperatur (Bereiche  $20\text{ °C} < T < 60\text{ °C}$  wurden betrachtet) in etwa den gleichen Reaktionsgrad [Bat 92, Luk 88]. Für die Zeit dazwischen besteht keine Einigkeit über den Verlauf. Einerseits konnte eine schubweise Reaktion gezeigt werden [Bat 92, Luk 88], andererseits wurde eine kontinuierlich fortschreitende Reaktion festgestellt [Hin 89, Lum 96, Sch 04]. Für die frühe Reaktion zeigt Bild 2-19 die Abhängigkeit des Reaktionsgrads von der Temperatur. Es verdeutlicht, dass die notwendige Zeit bis zu einem bestimmten Reaktionsgrad mit ansteigender Temperatur exponentiell abnimmt. Eine Erhöhung von  $20\text{ °C}$  auf  $40\text{ °C}$  bewirkt eine um den Faktor 5 bis 6 schnellere Reaktion.

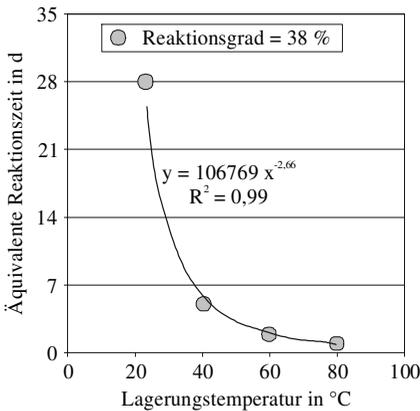


Bild 2-19: Äquivalente Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Temperatur; Zementstein mit 50 M.-% Hüttensand,  $w/z = 0,48$ ; Daten aus [Bat 92]

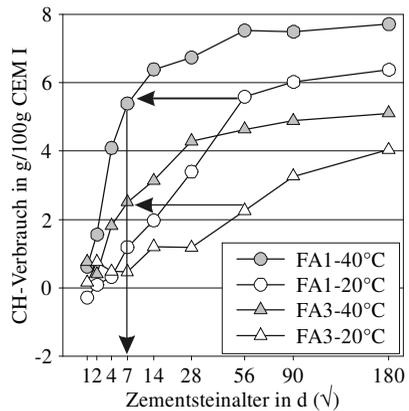


Bild 2-20: Verlauf des CH-Verbrauchs zweier Flugaschen bei 20 und 40 °C Lagerungstemperatur, Zementstein mit 20 M.-% Flugasche,  $w/(z+f) = 0,5$  [Syb 93]

Bild 2-20 zeigt anhand des CH-Verbrauchs die Reaktionsverläufe zweier unterschiedlich reaktiver Flugaschen. Danach wird der bei  $20\text{ °C}$  nach 56d festgestellte CH-Umsatz (Reaktionsgrad) bei  $40\text{ °C}$  bereits nach 7d erreicht. Das be-

deutet eine um das 8-fache schnellere Reaktion in diesem frühen Stadium. Darüber hinaus ist anerkannt, dass Flugasche kontinuierlich reagiert und der Reaktionsgrad sich asymptotisch einem Grenzwert annähert [Luk 88, Syb 93].

Für Silikastaub liegen derart präzise Untersuchungen nicht vor. Aus der Entwicklung der Festigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur wurde gefolgert, dass Silikastaub wie Flugasche und Hüttensand auch, bei 20 °C langsamer reagiert als Portlandzementklinker. Bei erhöhten Temperaturen wurden gleiche Festigkeiten bei Verwendung von Silikastaub rd. 9-mal schneller erreicht [Sel 87].

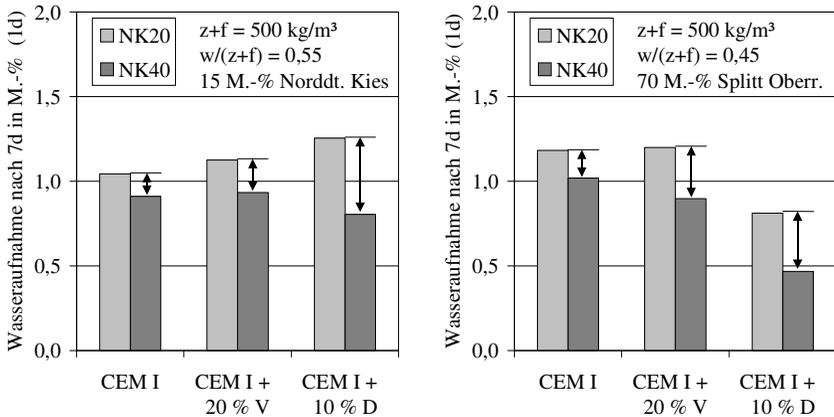


Bild 2-21: Einfluss von Puzzolanen (V = Flugasche, D = Silikastaub) und Lagerungstemperatur (NK20 bzw. NK40 = 20 °C- bzw. 40 °C-Nebelkammer) auf die Wasseraufnahme von Balken mit den Abmessungen 10x10x50 cm  
links: Beton mit norddeutschem Kies  
rechts: Beton mit Splitt vom Oberrhein

Die bisher dargestellten Daten sind auf Grund der verschiedenen Untersuchungsmethoden nicht direkt vergleichbar. Ein Indiz dafür, dass sie dennoch die realen Verhältnisse widerspiegeln, liefert Bild 2-21. Es zeigt vergleichend die Wasseraufnahme von Betonbalken unterschiedlicher Zusammensetzung nach 1d in der Schalung und 6d in der 20 bzw. 40 °C-Nebelkammer des FIZ. Sie ist demnach nach 7d bei 20 °C prinzipiell größer als bei 40 °C. Das widerspricht dem Sachverhalt, dass bei einem infolge der höheren Temperatur von 40 °C höheren Hydratationsgrad der Unterdruck in den Gelporen und damit die Wasseraufnahme größer sein muss als bei 20 °C. Eine Erklärung dafür ist, dass gleichzeitig das Gefüge bei 40 °C vermehrt durch Hydratationsprodukte verdichtet wird und infolge dessen eine Wasseraufnahme gegenüber der Lagerung bei 20 °C nur noch eingeschränkt möglich ist. Dieser Effekt ist offenbar bei Verwendung von Flugasche und Silikastaub besonders ausgeprägt und er bestä-

tigt den beschleunigenden Einfluss der Temperatur auf die Gefügeentwicklung vor allem bei Puzzolanen.

Insgesamt zeigen die dargestellten Ergebnisse, dass Hüttensand, Flugasche und Silikastaub bei erhöhten Lagerungstemperaturen unterschiedlich stark aktiviert werden ( $S < V < D$ ). Dabei scheint die Beschleunigung gegenüber dem zeitlichen Verhältnis des Schadenseintritts bei einer schädigenden AKR zwischen 20 °C und 40 °C von rd. 4:1 grundsätzlich größer zu sein (5:1 bis 9:1).

## **2.4 Prüfverfahren**

### *2.4.1 Bedeutung und Anforderungen*

Zur Beurteilung einer potentiell schädigenden AKR sind verschiedene Prüfverfahren erforderlich. Sie betreffen

1. die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung und
2. die Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR.

Um Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR ergreifen zu können, muss zunächst die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung bekannt sein [Nix 04, Swa 92a, VDZ 02]. Andernfalls kann die Gesteinskörnung vor dem Hintergrund einer dauerhaften Betonbauweise entweder nicht eingesetzt werden oder es ist der ungünstigste Fall (alkaliempfindlich) mit entsprechend weitreichenden Maßnahmen anzunehmen.

Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR sollten erst dann in einem Bauwerk eingesetzt werden, wenn ihre Wirksamkeit mit ausreichender Sicherheit nachgewiesen ist. Um die Übertragbarkeit zu gewährleisten, müssen die Abfolge und Mechanismen der Einzelreaktionen (AKR, puzzolanische und latent-hydraulische Reaktion), die Eigenschaften der Reaktionsprodukte sowie das resultierende Gefüge richtig abgebildet werden [Ido 97]. Eine etwaige Vermeidung einer schädigenden AKR muss sowohl im Labor als auch in der Praxis auf denselben Phänomenen beruhen. Weitere allgemeine Anforderungen an Prüfverfahren sind eine möglichst kurze Prüfdauer, eine einfache Handhabung sowie eine ausreichende Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit [Ber 94, Swa 92a].

### *2.4.2 Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen*

Auf Grund der natürlichen Vielfalt der Gesteinskörnungen und der unterschiedlichen Behandlung der AKR-Problematik in den betroffenen Ländern wurden

international etwa 40 Prüfverfahren entwickelt [ACI 98, Ber 94, Ido 97, Nix 96]. Sie können unterteilt werden in direkt an der Gesteinskörnung durchgeführten Prüfungen und solchen, bei denen das Verhalten der Gesteinskörnung in Mörtel oder Beton untersucht wird.

Da der Schädigungsprozess infolge einer AKR sehr langsam abläuft, muss er für eine zeitnahe Beurteilung in einem Prüfverfahren beschleunigt werden. Dazu werden eine oder mehrere der folgenden Maßnahmen angewendet [Ber 96].

- Erhöhung der Alkalikonzentration, der die Gesteinskörnung ausgesetzt ist, durch Verwendung alkalireicher Beton- bzw. Mörtelzusammensetzungen oder Einlagerung in alkalischen Lösungen,
- Lagerung der Proben bei erhöhten Temperaturen, z. B. 38, 40, 60 oder 80 °C,
- Lagerung der Proben bei erhöhtem Druck, z.B. im Autoklaven,
- Lagerung der Proben bei relativer Luftfeuchte nahe 100 % oder unter Wasser,
- Vergrößerung der reaktiven Oberfläche der Gesteinskörnung durch Brechen oder Mahlen.

#### 2.4.2.1 *Petrographische Beurteilung*

Bei der obligatorischen Analyse einer Gesteinskörnung gemäß DIN EN 932-3 ist die Identifizierung alkaliempfindlicher Bestandteile nicht explizit verlangt. Dagegen ist bei einer Beurteilung nach ASTM C 295 und [Sim 03a] anzugeben, in welchem Umfang alkaliempfindliche Bestandteile in der zu beurteilenden Gesteinskörnung enthalten sind und welche weiteren Untersuchungen zur Qualifizierung und Quantifizierung des Schädigungspotentials durchzuführen sind. Der petrographischen Analyse, bei der vor allem lichtmikroskopische und röntgendiffraktometrische Methoden sowie chemische Aufschlussverfahren eingesetzt werden [Bern 04, Fran 99, Hil 05, Hof 88, Sim 03], wird damit eine Sonderstellung eingeräumt. Dennoch kann darüber keine direkte Beurteilung zum Verhalten der Gesteinskörnung im Beton abgegeben werden.

#### 2.4.2.2 *Chemische Untersuchungsmethoden*

Bei den chemischen Untersuchungsverfahren wird i.d.R. über das Verhalten der gemahlener oder gebrochenen Gesteinskörnung in basischen Lösungen auf deren Alkalireaktivität geschlossen. Häufig werden die Lösungen dabei erwärmt. Als Indikatoren werden die OH<sup>-</sup>-Ionenkonzentration, der Alkaligehalt

und/oder der Anteil an gelöster Kieselsäure in der Lösung sowie der Masseverlust der Gesteinskörnung herangezogen [ASTM C 289, Cha 05, Deu 07, NF P 18-589]. Insbesondere das Verfahren nach ASTM C 289 wurde intensiv auf seine Aussagefähigkeit hin untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass z.B. präkambrische Grauwacke und karbonathaltige Gesteine als nicht alkaliempfindlich und somit falsch eingeschätzt werden [Ber 94, Spr 98].

Die genannten Prüfverfahren liefern relativ zeitnah Ergebnisse. Allerdings lassen sie nur eine Aussage zur prinzipiellen Alkaliempfindlichkeit der untersuchten Gesteinskörnung zu. Das Verhalten der Gesteinskörnung im Beton kann mit den Verfahren, obwohl sie zum Teil an Erfahrungen aus der Praxis kalibriert wurden, nur sehr selten beurteilt werden [Deu 07, Gil 73, Ido 92, Spr 98].

### 2.4.2.3 Mörtelprüfungen

Für Mörtelprüfungen werden feine Gesteinskörnungen (je nach Prüfvorschrift  $D < 4$  bis  $5$  mm) i.d.R. wie vorliegend eingesetzt. Grobe Gesteinskörnungen werden gebrochen, gesiebt und die Kornfraktionen entsprechend einer vorgegebenen Sieblinie kombiniert. Mit den aufbereiteten Gesteinskörnungen werden Mörtelprismen definierter Zusammensetzung hergestellt und unter feuchten Bedingungen bei Raumtemperatur nachbehandelt. Anschließend werden die Prismen nach Bestimmung der Ausgangslänge mehr oder weniger beschleunigenden Reaktionsbedingungen ausgesetzt. Die Längenänderung der Prismen wird nach vorgeschriebenen Zeitintervallen gemessen und die daraus berechnete Dehnung mit vorgegebenen Grenzwerten verglichen. Letztere variieren und können den jeweiligen nationalen Regelungen und im Folgenden zitierten Veröffentlichungen entnommen werden. Die Prüfungen dauern in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen von einer Woche bis zu einem Jahr.

Bei der Prüfung gemäß ASTM C 227 zur Überprüfung von Kombinationen aus Zement und Gesteinskörnung werden die Prismen der Abmessung  $2,5 \times 2,5 \times 28,5$  mm<sup>3</sup> bei 38 °C über Wasser in einem speziellen Container gelagert. Um eine gleichmäßig hohe Luftfeuchte zu gewährleisten, sind die lotrechten Innenflächen des Containers mit wassersaugendem Material verkleidet, das bis in das Wasserbad unter den Prismen reicht. Das Verfahren liefert für schnell reagierende Gesteinskörnungen mit der Praxis vergleichbare Ergebnisse [ACI 98]. Langsam oder spät reagierende Gesteine wie Grauwacke oder Gneiss werden dagegen auch dann nicht zielsicher erkannt, wenn der Alkaligehalt des Portlandzements  $> 1,0$  M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$  ist [ACI 98, Tou 01]. Ursache ist eine übermäßige Auslaugung der Prismen [Hoo 89, Rog 89]. Des Weiteren ist die lange Prüfdauer von bis zu 12 Monaten nachteilig.

Zur Beschleunigung wird in vergleichbaren Verfahren eine höhere Temperatur [Dun 74] vorgeschrieben oder der Alkaligehalt des Zements durch Aufdotieren mit NaOH auf einen Wert von 1,25 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq.}}$  erhöht (NF P 18-585). Zur Abminderung der Oberflächenkondensation und dadurch bedingten Auslaugung werden die Prismen dabei in Folie eingepackt oder über Wasser in einem unverkleideten Edelstahlcontainer, der wiederum in einer Truhe über Wasser steht, gelagert [Ran 94, Sor 89]. Untersuchungsergebnisse weisen darauf hin, dass langsam reagierende Gesteinskörnungen mit diesen Maßnahmen besser, aber nicht vollständig erkannt werden [Hoo 89]. Darüber hinaus dauert die Prüfung weiterhin 4 bis 6 Monate. Eine weitere Verkürzung ( $< 1$  Monat) wird durch eine erhöhte Lagerungstemperatur von  $70\text{ }^\circ\text{C}$  bei gleichzeitiger Aufdotierung des Zements mit NaOH auf 2,5 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq.}}$  erreicht [Phi 04, StaJ 06]. Prinzipiell wurden mit diesem Prüfverfahren zufrieden stellende Ergebnisse erzielt [StaJ 06]. Auf Grund der sehr scharfen Prüfbedingungen darf dieses Verfahren jedoch nicht zur endgültigen Beurteilung einer alkaliempfindlichen Gesteinskörnung herangezogen werden [Deu 07].

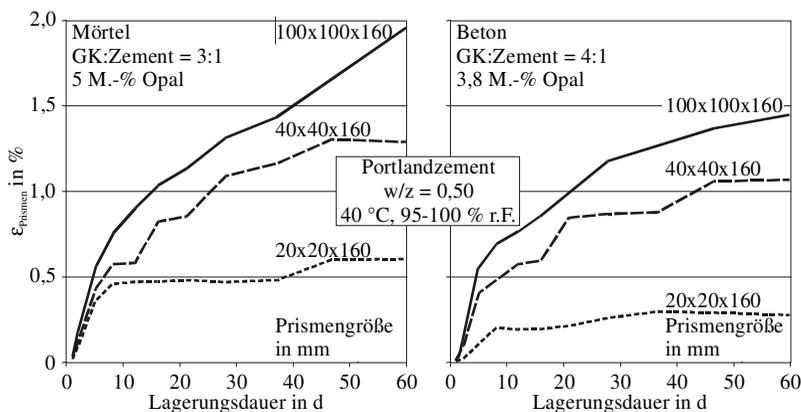


Bild 2-22: Einfluss des Probekörperquerschnitts auf die Dehnung von Mörtel- (links) und Betonprismen (rechts) mit Opal [Bak 83]

Das am weitesten verbreitete, als NBRI oder Oberholster-Verfahren bezeichnete Mörtelprüfverfahren liefert bereits nach 14d Ergebnisse [ACI 98, Nix 96]. Dabei werden die Mörtelprismen in  $80\text{ }^\circ\text{C}$  heißer 1 M NaOH-Lösung gelagert. Jedoch weisen zahlreiche Untersuchungen darauf hin, dass durch die sehr strengen Prüfbedingungen Gesteinskörnungen als alkaliempfindlich eingestuft werden, die in der Praxis nicht zu Schäden führen [Gra 96, Mul 01, Ril 00, Tou 01]. Daher wird dieses Prüfverfahren i.d.R. zur Vorauswahl verwendet, um unempfindliche Gesteinskörnungen schnell zu identifizieren [Sim 03]. Wird eine gewisse Reaktivität der Gesteinskörnung festgestellt, wird eine weitere Untersuchung mit praxisnäheren Betonprüfverfahren (siehe Abschnitt 2.4.2.4) vorge-

schrieben [Ber 94, Sim 03]. Mit minimalen Adaptionen ist das NBRI-Verfahren mittlerweile auch in Deutschland anwendbar. Hinsichtlich des Vorgehens zur Bewertung von Gesteinskörnungen wird jedoch wie zuvor beschrieben verfahren [Sie 06, Deu 07, Fran 04].

In weiteren Verfahren werden die Mörtelprismen bei 50 °C in gesättigter NaCl-Lösung [Cha 78], bei 60 °C in Natronlauge [Mul 01] oder im Autoklaven behandelt [Cri 92, Nis 87, Tan 83]. Letztgenannte Verfahren liefern sehr schnell Ergebnisse, sind jedoch nur an wenigen Gesteinskörnungen erprobt. Außerdem sind die Prüfbedingungen auf Grund von Temperaturen über 100 °C und einer Druckbelastung von i.d.R. 0,15 MPa in keiner Weise mit baupraktischen Bedingungen vergleichbar. Es ist daher anzunehmen, dass auf Basis der Ergebnisse dieser Prüfungen nicht zielsicher auf das Verhalten der Gesteinskörnung im Bauwerk zurück geschlossen werden kann.

Zahlreiche Einflüsse auf die verschiedenen Mörtelprüfverfahren sind untersucht worden [Gra 89, Obe 86, Wig 95]. Sie sind bereits weitgehend in die Ausführungen in Abschnitt 2.2 eingeflossen. Darüber hinaus wurde unabhängig von den Verfahren ein Einfluss der Probekörpergröße festgestellt [Bak 83, Bar 83, Wig 95, Zha 99]. Dabei korrelierte die Dehnung stets mit der Größe der Prismen (siehe Bild 2-22). Als mögliche Ursache wird vermutet, dass die Auslaugung bei schlanken Prismen größer ist als bei kompakten [Bar 83]. Ferner wird die Messung der Längenänderung an heißen Probekörpern kritisch betrachtet, da bereits innerhalb einer Minute Dehnungsunterschiede infolge Temperaturabfall von 0,01 % auftreten können [StaJ 06, Wig 95].

#### 2.4.2.4 *Betonprüfungen*

Das Vorgehen bei den Betonprüfungen ist dem der Mörtelprüfungen sehr ähnlich. Die wesentlichen Unterschiede sind, dass

- die verdächtigen Gesteinskörnungen in den Korngrößen, wie sie in der Praxis zur Anwendung kommen, geprüft werden,
- die Größe der Probekörper entsprechend angepasst wird (kleinste Abmessung > D/4, übliche Abmessungen sind 7,5 x 7,5 x 28 bzw. 40 cm<sup>3</sup>) und
- sich das Massenverhältnis zwischen Zement und Gesteinskörnung zugunsten der Gesteinskörnung ändert.

Vor allem der Nachteil der Mörtelprüfungen, dass durch das Brechen der Gesteinskörnung bei der Verwendung im Beton nicht vorhandene reaktive Oberflächen geschaffen oder freigelegt werden [Ran 94], wird dadurch eliminiert.

Die erste Betonprüfung wurde in den 1950er Jahren in Kanada entwickelt [Ber 94]. Der Beton enthielt  $310 \text{ kg/m}^3$  Portlandzement, der durch Zugabe von NaOH auf einen Alkaligehalt von 1,25 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$  aufdotiert wurde; der w/z-Wert betrug 0,42 bis 0,45. Nach dem Ausschalen wurden die Prismen bei  $38 \text{ }^\circ\text{C}$  über Wasser in ähnlichen Containern wie bei der Mörtelprüfung (wassersaugende Auskleidung) gelagert. Die Dehnung der Prismen durfte nach einem Jahr 0,04 % nicht überschreiten. Langsam reagierende Gesteinskörnungen wurden mit dieser Betonzusammensetzung nicht erkannt. Eine Anhebung des Zementgehalts auf  $420 \text{ kg/m}^3$  hat die Sicherheit erhöht, jedoch werden sehr langsam reagierende Gesteinskörnungen weiterhin nicht zielsicher erfasst [Ber 94].

In Kanada ist das Prüfverfahren in die Betonnorm aufgenommen worden (CSA 23.2-14A). Mit kleinen Änderungen wurde es in den USA (ASTM C 1293), in Norwegen (NB Publication No. 32) und in die Reihe der RILEM-Recommendations zur Prüfung alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen [Ril 00] übernommen. Es liefert die am besten mit der Praxis vergleichbaren Ergebnisse [ACI 98, Gra 89, Mul 01, Swa 92] und wird daher international häufig als Referenz bei Vergleichen zwischen verschiedenen Prüfverfahren eingesetzt.

Größere Abwandlungen wurden in der britischen Prüfvorschrift BS 812 vorgenommen. Ein sehr hoher Zementgehalt von  $700 \text{ kg/m}^3$  bei einem Alkaligehalt des Zements von 1,0 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$  kann dabei zur Überschätzung der Alkaliempfindlichkeit führen [Gra 89]. Zudem müssen die Prismen in angefeuchtete Baumwolltücher gewickelt und mit Folie gegen Wasserzutritt geschützt werden. In Frankreich wurde der bereits für die Mörtelprüfung eingesetzte Reaktor, in dem die Prismen in Edelstahlcontainern lagern, auch für die Betonprüfung übernommen (NF P 18-587). Durch beide Maßnahmen sollte wiederum der Einfluss einer Auslaugung, wie er auch für Beton aufgezeigt wurde [Riv 03, Rog 89], vermindert werden.

In Deutschland wurde unabhängig von den übrigen Entwicklungen in den 1970er Jahren eine Betonprüfung zur Untersuchung einer möglichen AKR eingesetzt. Zusätzlich zu Prismen der Abmessung  $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$  wird dabei ein Würfel mit 30 cm Kantenlänge hergestellt und nach dem Ausschalen in einer  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ -Nebelkammer gelagert [Bon 73, VDZ 73]. Mit festgelegtem Zementgehalt von  $400 \text{ kg/m}^3$ , einem Alkaligehalt des CEM I-Zements von 1,3 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$ , sowie einem w/z-Wert von 0,45 wurde die Prüfung 1997 in die Richtlinie übernommen [Deu 97]. Eine Gesteinskörnung gilt danach als reaktiv, wenn ein Beton mit 70 M.-% dieser Gesteinskörnung nach 9 Monaten eine Dehnung  $> 0,06 \text{ } \%$  oder der Würfel eine Rissweite  $> 0,2 \text{ mm}$  aufweist. Durch die Nebelkammerlagerung sollte eine sich negativ auswirkende Auslaugung wie bei einer Unterwasserlagerung weitgehend vermieden werden [VDZ 73]. Ergebnisse zum Einfluss der Probekörpergröße auf die Maximaldehnung [Sie 97] geben jedoch einen Hinweis auf eben diesen Einfluss. Bei näherer Auswertung der Daten

zeigt sich sogar, dass in einem Teilbereich eine lineare Abhängigkeit zu dem eine Auslaugung bestimmenden A/V-Verhältnis [Hoh 03] der prismatischen Betonprobekörper vorzuliegen scheint (Bild 2-23). Zusätzlich wurde insbesondere bei leimreichen Betonen festgestellt (unveröffentlicht), dass sie in der Nebelkammer sehr viel mehr Wasser aus der Umgebung aufnehmen als unter praxishen Lagerungsbedingungen. Das bedeutet mehr freies Wasser im Probekörper, so dass die Porenlösungskonzentration dadurch ebenfalls reduziert wird. Umgekehrt ist auf Grund der Beobachtungen anzunehmen, dass die Betonbalken im Außenlager zumindest temporär soweit austrocknen, dass eine schädigende AKR nicht mehr stattfindet.

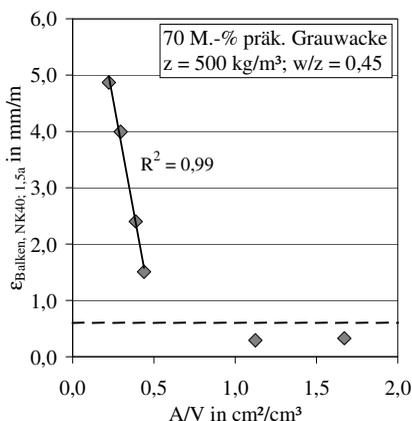


Bild 2-23: Maximaldehnung von Prismen unterschiedlicher Größe mit alkaliempfindlicher Grauwacke in Abhängigkeit von deren Oberflächen/Volumen-Verhältnis [Daten aus Sie 97]

Auf Basis der französischen Versuchsanordnung gemäß NF P 18-587 wurden in den letzten Jahren vermehrt auch Versuche bei 60 °C durchgeführt [Gro 00, Fou 04, Tou 01, Sie 06]. Auf Grundlage einer Beurteilung bereits nach 3 Monaten und Grenzwerten zwischen 0,02 und 0,04 % zeigen die Ergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den bekannten Erfahrungen aus Untersuchungen bei 38 °C über Wasser und der Prüfung bei 40 °C in der Nebelkammer [Tou 01, Sie 06]. In Deutschland ist dieses Verfahren bereits im Anhang der Alkali-Richtlinie aufgeführt [Deu 07]. Jedoch wird auch darauf verwiesen, dass ggf. durch die hohe Temperatur der OH<sup>-</sup>-Ionengehalt der Porenlösung zu Gunsten des SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Gehalts abfällt (siehe auch Abschnitt 2.2.3.1) und eine Auslaugung die Porenlösungskonzentration abmindert [Fou 04, Tho 06]. Ferner scheinen unvorhergesehene Reaktionen von Bestandteilen der ergänzend zugegebenen nichtempfindlichen Gesteinskörnung bei einer Temperatur von 60 °C aufgetreten zu sein, die die Zuverlässigkeit der Prüfung beeinflussen [Tho 06].

In Anlehnung an das NBRI-Mörtelprüfverfahren werden Betonprismen zur Beschleunigung der schädigenden AKR zum einen in 80 °C heißer Natronlauge und zum anderen bei 150 °C in Lösungen, deren Zusammensetzung wie die der

Porenlösung sein soll, gelagert [Berr 05, Ber 94, Cri 95]. Obwohl von sehr gut mit den Ergebnissen der üblichen Lagerung bei 38 °C über Wasser korrelierenden Ergebnissen berichtet wird, ist zweifelhaft, ob die Beobachtungen jeweils auf den gleichen Phänomenen beruhen. Untersuchungen liegen hierzu jedoch nicht vor.

### 2.4.3 Prüfung der Wirksamkeit von Zementen zur Vermeidung einer AKR

Um für eine bestimmte Qualität eines Zementhauptbestandteils oder Betonzusatzstoffs den Anteil im Zement oder Beton zu bestimmen, der eine schädigende AKR zielsicher vermeidet, ist dessen Wirksamkeit unter den ungünstigsten zu erwartenden Bedingungen zu untersuchen. In der Prüfung gemäß ASTM C 441, der einzigen Norm für diese Fragestellung, wird dies dadurch gewährleistet, dass sehr reaktives Pyrexglas® als Gesteinskörnung in der Mörtelprüfung bei 38 °C über Wasser eingesetzt wird [ACI 98]. Abnahmekriterien sind für die Prüfung nicht in der ASTM C 441 definiert, sondern sind den entsprechenden Stoffnormen zu entnehmen (ASTM C 618 für Flugasche, ASTM C 989 für Hüttensand, ASTM C 1240 für Silikastaub, ASTM C 595 und C 1157 für Kompositzement).

Zur Entwicklung von NA-Zementen wurde in Deutschland zunächst ähnlich vorgegangen. Die Dehnung kleinformatiger Betonprismen mit 600 kg/m<sup>3</sup> des zu prüfenden Zements, w/z = 0,43; 40 M.-% Duranglas® in den Korngruppen 1/3 und 3/7 mm und bei 40 °C über Wasser gelagert, wurde mit der Dehnung eines Referenzmörtels mit geringem Gesamtalkaligehalt verglichen [Loc 75, VDZ 73]. Teilweise wurden die Ergebnisse an praxisnahen Betonen mit norddeutschem Kies, die in einer 40 °C-Nebelkammer sowie im Freien lagerten, verifiziert [Bon 73, Bon 86]. Derzeit ist die Wirksamkeit von Zementen zur Vermeidung einer schädigenden AKR auf Basis eines Prüfplans des Deutschen Instituts für Bautechnik nachzuweisen [DIB 99]. Dazu werden Betonprobekörper der folgenden, nach [Bon 86, Sie 01] besonders kritischen Zusammensetzung gemäß Alkali-Richtlinie [Deu 01] hergestellt, gelagert und bewertet:

- $z = 500 \text{ kg/m}^3$  (zu untersuchender Zement),
- w/z-Wert = 0,55,
- Kornband (Gesteinskörnung) entsprechend Sieblinie B/C 16 gemäß DIN 1045-2,
- 15 M.-% norddeutscher Kies in der Korngruppe 2/8 mm als alkaliempfindliche Gesteinskörnung (Pessimum)

In Fällen mit großem Abstand zu bereits anerkannten NA-Zementen wird darüber hinaus gefordert, dass Probekörper einer Freibewitterung ausgesetzt und über einen Zeitraum von 5 Jahren geprüft werden.

Insbesondere das Vorgehen gemäß ASTM C 441 wird hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse kritisch bewertet [Ber 92, PCA 98, Tho 06]. Prinzipiell wird angemerkt, dass die erforderlichen Mindestmengen an Hüttensand oder Puzzolan im Zement oder Beton ggf. sehr hoch sind, weil eine sehr reaktive Gesteinskörnung eingesetzt wird, die u.U. zusätzlich Alkalien freisetzt [ACI 98, Lan 99, Tho 95, Str 00, Tho 06]. Das kann aus Gründen der Verarbeitbarkeit (Silikastaub), Festigkeitsentwicklung (Flugasche, Hüttensand) und Dauerhaftigkeit (Frost, Carbonatisierung) nachteilig sein. Entsprechend ist es für weniger reaktive oder langsam reagierende Gesteinskörnungen sinnvoll, die erforderlichen Mindestmengen besser auf ihre Reaktivität und Kinetik abzustimmen.

Zu diesem Zweck werden nahezu alle Prüfungen zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit derart eingesetzt, dass in einer Serie von Versuchen mit der betreffenden Gesteinskörnung der verwendete Portlandzement sukzessive gegen Hüttensand oder Puzzolane ausgetauscht wird [ACI 98, Ber 92, StaD 93, Tho 95, Tou 01]. Die Mindestmenge an Hüttensand oder Puzzolanen zur Vermeidung einer schädigenden AKR ergibt sich dabei aus dem Kriterium, dass der geprüfte Mörtel oder Beton die Grenzwerte der entsprechenden Prüfverfahren zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung einhalten muss (Bild 2-24). Gelegentlich wird empfohlen die Prüfdauer zu verlängern, um der langsamen Reaktionskinetik von Hüttensand und Flugasche gerecht zu werden [ACI 98, Ber 92].

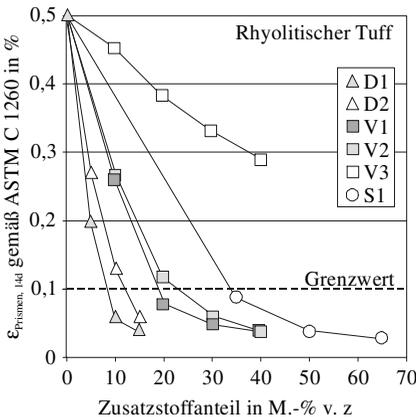


Bild 2-24: Festlegung von Mindestmengen an Hüttensand (S) oder Puzzolanen (D, V) anhand der Maximaldehnung von Mörtelprismen in Anlehnung an ASTM C 1260 [Ber 92]

Am häufigsten werden die Mörtelprüfung bei 80 °C in 1 N Natronlauge und die Betonprüfung bei 38 °C über Wasser zu diesem Zweck angewendet [Ber 92, PCA 98, Tho 96, Sha 96, Sha 92, Tou 01]. Aus Vergleichen zwischen diesen

Prüfverfahren geht hervor, dass sie in vielen Fällen zu ähnlichen Mindestmengen an Hüttensand und Puzzolanen führen [Tou 01, Ber 92, Tho 06]. Auf Grund der kürzeren Prüfdauer der Mörtelprüfung bei 80 °C in 1 N Natronlauge wird diese häufig bevorzugt. Um sehr schnell eine Aussage zu bekommen, werden Mörtelprismen z.T. auch im Autoklaven bei Temperaturen > 100 °C geprüft [Cri 92, Duc 92]. Sie sind trotz vermeintlich guter Übereinstimmung [Duc 92] derzeit nicht zu empfehlen, da aufgetretene Dehnungen auf unter Normalbedingungen nicht auftretende treibende Reaktionen zurückgeführt wurden [Cri 95, Wan 04] bzw. der Effekt auf unterschiedlichen Phänomenen beruht [Tho 06].

Auch für die übrigen Prüfverfahren bestehen Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit. So wird eine etwaige Auslaugung als kritisch angesehen. Es wird vermutet, dass bis zum späten Eintreten einer Dehnung mehr Alkalien dem Probekörper entzogen werden als in der Praxis und die Gefahr eine AKR somit unterschätzt wird [Ber 94, Str 00]. Des Weiteren besteht Unklarheit über die zeitliche Relation zwischen AKR und der Reaktion von Hüttensand bzw. Flugasche zueinander. Einerseits wird davon ausgegangen, dass eine AKR stärker beschleunigt wird als die Reaktion von Hüttensand und Flugasche und deshalb ihre positive Wirkung unter Normalbedingungen unterschätzt wird [ACI 98, Hoo 96, Sha 96]. Andererseits wird sogar bei schnell reagierenden Gesteinskörnungen zumindest von einer gleich schnellen und damit konkurrierenden Reaktion von Hüttensand und Puzzolanen ausgegangen [Bok 04]. Schließlich weisen Untersuchungen mit kieselsäurehaltigen Gesteinsmehlen darauf hin, dass auf Grund einer bei erhöhter Lagerungstemperatur von 80 °C (in 1 N Natronlauge) gezeigten Puzzolanität eine AKR kontrolliert werden kann, während dies bei 38 °C (über Wasser) nicht der Fall ist [Ped 04]. Die Wirksamkeit hinsichtlich der Vermeidung einer AKR durch den Einsatz von Gesteinsmehl wird damit überschätzt. Aussagen zu einem diesbezüglichen Verhalten von Hüttensand oder Puzzolanen in Abhängigkeit der Prüfbedingungen liegen bisher nicht vor.

#### 2.4.4 *Performance-Prüfung am Beton*

In der Baupraxis werden häufig Korngemische aus verschiedenartigen Gesteinskörnungen und Vorkommen im Beton eingesetzt. Eine präzise Vorhersage zu einer potentiellen Schädigung infolge AKR ist dann auf Grundlage von Untersuchungen mit den einzelnen Gesteinskörnungen nicht mehr möglich. Darüber hinaus wird die bedarfsgerechte Bestimmung des zur Vermeidung einer schädigenden AKR notwendigen Anteils an Hüttensand oder Puzzolan nahezu unmöglich. Letztlich haben auch die meisten betontechnologischen Parameter einen Einfluss auf eine schädigende AKR (Abschnitt 2.2.2), die in den bisher vorgestellten Prüfverfahren nicht berücksichtigt wurden. Um die Summe aller Einflüsse korrekt zu erfassen und den tatsächlichen Bedingungen entsprechende

Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR überprüfen zu können, besteht daher der Bedarf an einer Prüfung, mit der für ein bestimmtes Bauvorhaben projektierte Betonzusammensetzungen auf eine potentiell schädigende AKR hin untersucht werden können.

Anfang der 1990er Jahre ist in Frankreich ein entsprechendes Prüfverfahren entwickelt worden [Bolo 92, Ran 92]. Prismen aus Baustellenbeton werden dabei in Anlehnung an das Prüfverfahren gemäß NF P 18-587 (Betonprismen in Containern bei 38 °C über Wasser) bei einer Temperatur von 60 °C gelagert. Im Vergleich zur Praxis treten bei dieser Temperatur noch keine signifikanten Änderungen in der Zusammensetzung und den Eigenschaften der im Zementstein enthaltenen Phasen auf [Ran 92]. Weitere Anpassungen betreffen eine gewisse Aufdotierung des Zements mit NaOH, um Produktionsschwankungen im wirksamen Alkaligehalt auf der sicheren Seite liegend zu berücksichtigen [Rou 96]. Nach der aktuell genormten Fassung (NF P 18-454, NF FD 18-456) erfolgt die Bewertung in Abhängigkeit davon, ob die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung bekannt ist oder nicht, nach 3 bzw. 5 Monaten. Sie muss jedoch bis zu einem Jahr fortgeführt werden, wenn der Dehnungsverlauf eine weitergehende Schädigung andeutet. Der Grenzwert wurde auf Basis umfangreicher Vergleichsuntersuchungen mit 0,02 % festgelegt (vgl. Bild 2-25).

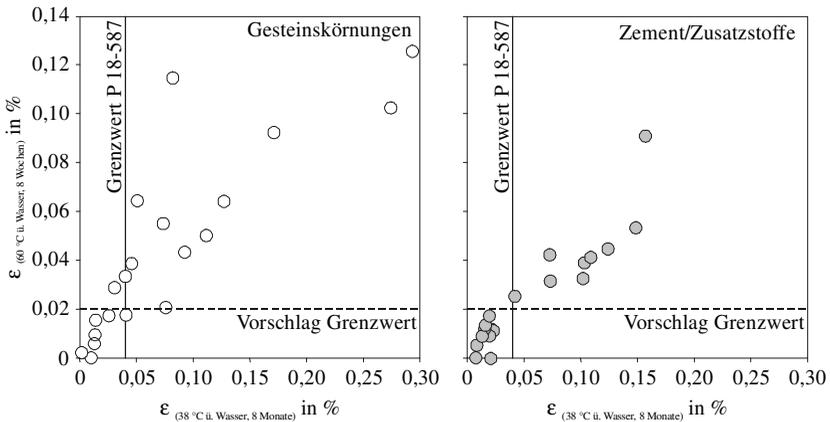


Bild 2-25: Vergleich der Enddehnung von Betonprismen  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$  mit verschiedenen Zusatzstoffen und alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen gelagert bei 38 °C und 60 °C über Wasser [Ran 92]

Insbesondere auf Grund des möglichen Zeitgewinns bis zur Beurteilung eines Betons werden eine Übernahme der Prüfung in das Regelwerk international diskutiert und entsprechende Untersuchungen zur Anbindung an bisherige Erfahrungen durchgeführt [Fou 04, Gro 00, Sie 06, Sim 04, Tha 04, Tou 01]. Die Erfahrungen aus Frankreich hinsichtlich Aussagefähigkeit sowie Reproduzier-

barkeit und Vergleichbarkeit wurden dabei weitgehend bestätigt [Fou 04, Gro 00, Sim 04, Tou 01]. Die abgeleiteten Bewertungskriterien weichen jedoch mit Werten für die Dehnung von 0,02 bis 0,04 % zum Teil von denen in Frankreich ab.

Eine kritische Überprüfung der in Abschnitt 2.4.1 benannten Anforderungen hat bisher nicht stattgefunden. Die Kritikpunkte aus Abschnitt 2.4.2.4 zur Prüfung der Alkaliempfindlichkeit unter gleichen Bedingungen ( $\text{SO}_4^{2-}$ -Gehalt der Porenlösung, Auslaugung, Reaktion nicht reaktiver Bestandteile) sind jedoch direkt auf die Performance-Prüfung übertragbar. Gleiches gilt für die Unsicherheit bezüglich der zeitlichen Relation der ablaufenden Reaktionen zueinander (Abschnitt 2.4.3).

Neben dem beschriebenen Verfahren wurde eine Klimasimulationskammer entwickelt, in der die baupraktischen Expositionsbedingungen, denen ein Beton ausgesetzt ist, im Zeitraffer abgebildet werden sollen [Bol 00, Dom 03, StaJ 06]. Trocken- und Feuchtperioden bei unterschiedlichen Temperaturen und der Einfluss einer Frost- bzw. Frost-Tausalzbelastung werden berücksichtigt. Erste Ergebnisse zeigen, dass Straßenbaubetone gemäß ZTV-Beton 01 und [ARS 06] bereits sehr früh unter den Prüfbedingungen mit Alkalizufuhr versagen können [Sey 05]. Als Ursache wird eine AKR vermutet. Eine Überprüfung weiterer Mechanismen wie Frost wurde jedoch bisher nicht durchgeführt. Untersuchungen von Betonen, die mit Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen oder Betonzusatzstoffen enthalten, wurden bisher nicht veröffentlicht.

## 2.4.5 Betonprüfverfahren – Übertragbarkeit der Ergebnisse

### 2.4.5.1 Internationale Erfahrungen

Die Möglichkeiten einer Fehlinterpretation von Versuchsergebnissen sind beträchtlich, wenn Reaktionsmechanismen und die zu simulierenden praktischen Rahmenbedingungen nicht ausreichend berücksichtigt werden [Ido 97]. Da eine AKR nur unter reaktionsbeschleunigenden und damit praxisfernen Bedingungen in akzeptablen Zeiträumen überprüft werden kann, liegt hier eine besondere Gefahrenquelle für Fehler.

Um bei der Bewertung der Ergebnisse aus Laborprüfungen eine größere Sicherheit zu gewinnen, ist ein Vergleich zwischen dem Verhalten von Probekörpern in der Laborprüfung und unter praktischen Umgebungsbedingungen zweckmäßig. Ein Nachteil solcher Untersuchungen ist ihre lange Dauer. Der entscheidende Vorteil gegenüber einem Vergleich mit einem Bauwerksbeton ist, dass die Betonzusammensetzung identisch ist und somit Ergebnisse aus der einen Lagerung mit denen der anderen Lagerung direkt verglichen werden können.

Außerhalb Deutschlands gibt es bisher nur wenige Labore, die Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborprüfungen auf baupraktische Bedingungen durchgeführt haben. Sie wurden in Kanada, Großbritannien und Südafrika abgewickelt [Fou 00a, Fou 04, Fou 04a, Hob 92, Hob 93, Obe 81, Obe 89, Rog 00, Tho 06]. Allerdings erhöht sich derzeit die Anzahl entsprechender Labore im Rahmen eines europäischen Verbundforschungsvorhabens zur Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen [Jen 03].

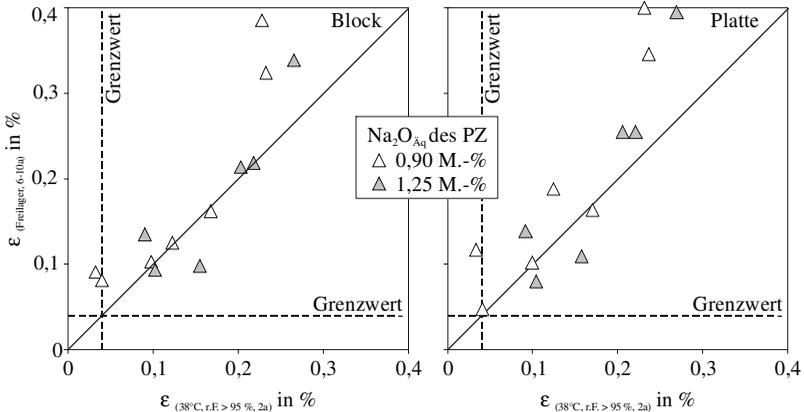


Bild 2-26: Vergleich der Dehnung von Beton mit Portlandzement ( $z = 420 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,40$ ) und unterschiedlichen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, Daten aus [Fou 04a]: Prismen  $7,5 \times 7,5 \times 30 \text{ cm}^3$  gelagert bei  $38 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $> 95 \%$  r.F. im Vergleich zu links: Betonblöcken  $40 \times 70 \text{ cm}^3$  im Freilager rechts: Betonplatten  $70 \times 70 \times 15 \text{ cm}^3$  im Freilager

Da mit vielen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen bereits langjährige baupraktische Erfahrungen vorliegen, können die Prüfverfahren zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung (Lagerungsbedingungen, Grenzwerte) an diesen kalibriert werden [Ber 94, Hob 92, Deu 97, Sha 92]. Entsprechend gut stellt sich die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Laborversuchen dar. In Bild 2-26 sind beispielhaft die Enddehnungen von vergleichend gemäß Prüfvorschrift und im Freien gelagerter Betonprobekörper dargestellt. Es zeigt, dass die Dehnung der Betone in beiden Lagerungen tendenziell vergleichbare Größenordnungen erreicht. Erwartungsgemäß – da an den baupraktischen Beobachtungen kalibriert – gilt das insbesondere für die Betone mit einem erhöhten Alkaligehalt, wie es bei der Prüfung der Alkaliempfindlichkeit nach kanadischem Standard CSA 23.2-14A vorgesehen ist. Gleiches konnte für das Prüfverfahren nach BS 812 gezeigt werden [Hob 92, Hob 93]. Zwei Versuche, bei denen die Dehnung während der Laborprüfung nahe dem Grenzwert und bei der Lagerung im Freien deutlich darüber liegt, deuten jedoch an, dass veränderte

Randbedingungen (geringerer Alkaligehalt) dazu führen können, dass das Verhalten des Betons unter praktischen Bedingungen falsch abgebildet wird.

Zemente mit Flugasche bzw. Betonzusatzstoffe werden, bezogen auf die Lebensdauer von Betonkonstruktionen, erst seit kurzem eingesetzt. Deshalb liegen nur sehr vereinzelt Berichte dazu vor, inwiefern der Einsatz von Flugasche eine schädigende AKR verhindert hat [Gud 99, Tho 92, Tho 96, ]. Eine Kalibrierung von Laborprüfungen (Prüfung der Wirksamkeit von Zementen zur Vermeidung einer AKR, Performance-Prüfung) am baupraktischen Verhalten ist daher bisher nicht möglich. Die Auswertung von vergleichend im Labor gemäß Vorschrift und im Freien gelagerter Probekörper bekommt dadurch eine besondere Bedeutung.

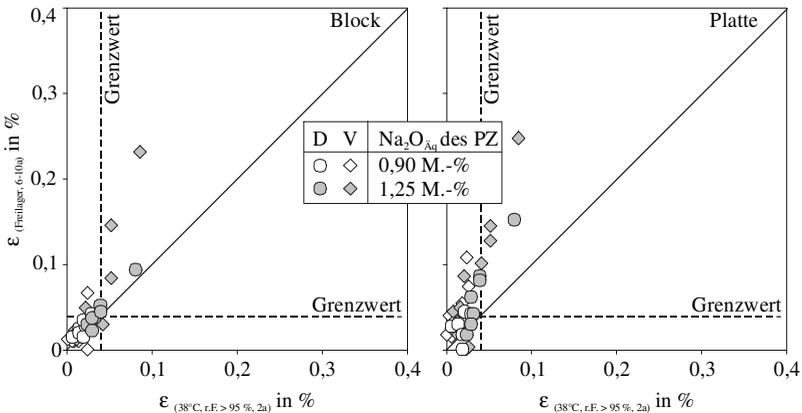


Bild 2-27: Vergleich der Dehnung von Beton mit unterschiedlichen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, in dem Portlandzement durch Puzzolane (D = Silikastaub; V = Flugasche) ersetzt wurde, Daten aus [Fou 04a]: Prismen 7,5 x 7,5 x 30 cm<sup>3</sup> gelagert bei 38 °C und > 95 % r.F. im Vergleich zu links: Betonblöcken 40 x 40 x 70 cm<sup>3</sup> im Freilager rechts: Betonplatten 70 x 70 x 15 cm<sup>3</sup> im Freilager

In Bild 2-27 sind Ergebnisse von Betonen dargestellt, die vergleichbar mit denen in Bild 2-26 sind. Lediglich ein Teil des Portlandzements wurde durch calciumarme Flugasche (20 und 30 M.-%) oder Silikastaub (7,5 und 10 M.-%) ersetzt. Aus der Darstellung geht hervor, dass tendenziell bei einer Lagerung des Betons im Freien größere Dehnungen erreicht werden als bei 38 °C und > 95 % relativer Luftfeuchte im Labor. Insbesondere gegenüber den Dehnungen der Betonplatten im Außenlager sind die Dehnungen der Prismen im Labor gering und führen zu einer falschen Beurteilung. Sie suggerieren, dass mit der gewählten Betonzusammensetzung keine Schäden infolge einer AKR auftreten sollten, obwohl die Ergebnisse im Freilager das Gegenteil zeigen. Vergleichbare Ergebnisse wurden bereits wesentlich früher in Südafrika erzielt [Obe 81, Obe 89].

U.a. deutet sich dort nach 7,5 a auch ein entsprechendes Verhalten bei Verwendung von Hüttensand zur Vermeidung einer schädigenden AKR an.

Insgesamt kann nach den international vorliegenden Ergebnissen nicht davon ausgegangen werden, dass ein Beton, der Zement mit mehreren Hauptbestandteilen oder Betonzusatzstoffe enthält, sich im Freien und bei 38 °C über Wasser vergleichbar verhält. Die Ursachen dieser Diskrepanz wurden in den entsprechenden Artikeln bisher nicht erörtert. Ein Einfluss der sehr unterschiedlichen Probekörpergeometrien lässt sich insbesondere vor dem Hintergrund einer möglichen Auslaugung nicht ausschließen [Duc 01, Riv 03, Tho 06].

#### 2.4.5.2 *Erfahrungen des FIZ*

Im FIZ werden seit Jahrzehnten vergleichende Untersuchungen zwischen der 40 °C-Nebelkammer und einer Außenlagerung durchgeführt. Teilergebnisse wurden bereits in [Bok 04, Bon 73, Bon 86, Sie 97, Sie 00] veröffentlicht. Sie betreffen insbesondere Beton mit norddeutschem Kies, der z.T. auch Puzzolane enthält. Es liegen jedoch noch eine Reihe weiterer Ergebnisse vor, die in den folgenden Darstellungen mit berücksichtigt sind.

Bis zum Eintritt einer schädigenden AKR im Beton vergeht ein gewisser Zeitraum. Er ist abhängig von der eingesetzten Gesteinskörnung, der Betonzusammensetzung und vor allem der Lagerung. Um bei der Bewertung der Übertragbarkeit mit ausreichender Sicherheit ausschließen zu können, dass sich bei einer weiterführenden Lagerung keine signifikanten Veränderungen mehr ergeben, sind ausreichend lange Lagerungszeiträume vor einer Beurteilung festzulegen. Für die 40 °C-Nebelkammerlagerung wurde für die folgende Auswertung die gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 [Deu 07] vorgesehene Prüfdauer angesetzt. Die Betone im Außenlager mussten auf Basis der langjährigen Erfahrungen im FIZ folgende Mindestalter erfüllen:

- CEM I Beton
  - mit sehr alkaliempfindlichem norddeutschen Kies:  $\geq 3a$
  - mit dichter alkaliempfindlicher Gesteinskörnung:  $\geq 5a$
- Beton mit Kompositzement/Betonzusatzstoffen:  $\geq 8a$  bis  $10a$

Als Kriterien für eine Betonschädigung wurden für Probekörper in der 40 °C-Nebelkammer wiederum die der Alkali-Richtlinie Teil 3 zu Grunde gelegt [Deu 07]. Für die der Außenlagerung wurde für die Rissweite am Würfel mit 30 cm Kantenlänge der Grenzwert  $w \geq 0,2$  mm übernommen, ab dem von einer treibenden Schädigung ausgegangen werden kann. Der Grenzwert für die Dehnung der Balken konnte nicht direkt übernommen werden. Im Vergleich zur 40 °C-Nebelkammer treten bei der Außenlagerung auf Grund einer Raumtemperatur

von 20 °C bei der Messung der Längenänderung der Balken im Mittel 0,2 mm/m geringere Temperaturdehnungen auf. Zusätzlich ist die Dehnung um weitere rd. 0,2 mm/m geringer, weil in der Nebelkammer eine erhöhte Quellung auftritt bzw. umgekehrt im Außenlager ein Schwinden der Balken zu verzeichnen ist. Die Dehnung der Balken ist somit im Außenlager prinzipiell um rd. 0,4 mm/m geringer als in der 40 °C-Nebelkammer. Entsprechend ergibt sich ausgehend vom zugehörigen Grenzwert von 0,6 mm/m für das Außenlager eine kritische Dehnung von 0,2 mm/m, ab der von einer Gefügeschädigung infolge einer AKR auszugehen ist.

### Beton mit Opalsandstein und Flint (Pessimum)

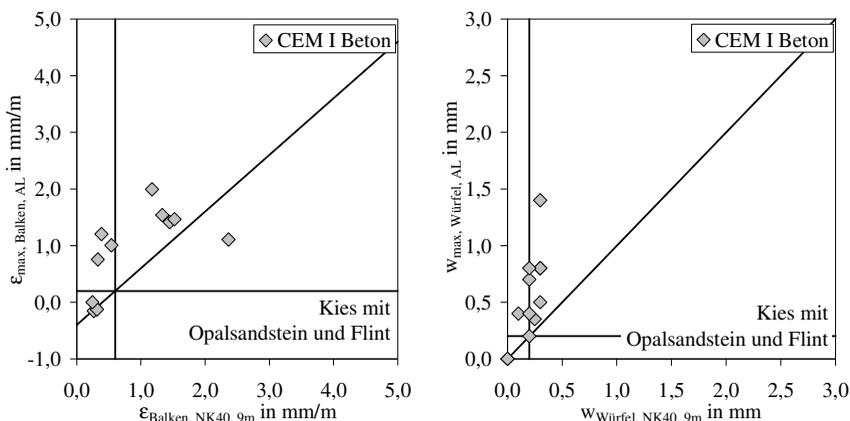


Bild 2-28: Dehnung (links) und Rissbildung (rechts) in der 40 °C-Nebelkammer (NK40) im Vergleich zur Außenlagerung (AL), Beton mit CEM I-Zement und 15 M.-% norddeutschem Kies in der Korngruppe 2/8 mm (Pessimum)

In Bild 2-28 sind Ergebnisse der CEM I-Betone mit norddeutschem Kies zusammengefasst, die seit 1986 hergestellt wurden. Von den lediglich 12 Betonen, die i.d.R. als Referenzbetone hergestellt wurden, liegen bei der Dehnung drei und bei der Rissbildung ein Beton im 2. Quadranten (links oben), der ausgeprägtere Betonschäden im Außenlager im Vergleich zur 40 °C-Nebelkammer ausweist. Auch die im 3. Quadranten (rechts oben) gelegenen Wertepaare zeigen diese Tendenz, da sie bis auf ein Wertepaar alle oberhalb der Diagonalen liegen. Diese Ergebnisse bestätigen die früherer Untersuchungen [Bon 86]. Auch dort wurde bereits deutlich, dass Beton mit alkaliempfindlichem norddeutschem Kies in einem Außenlager dazu neigt, größere Schäden als in der 40 °C-Nebelkammer aufzuweisen. Insgesamt wird somit die Gefahr einer AKR tendenziell unterschätzt, wenn CEM I-Beton mit norddeutschem Kies (pessimaler Anteil) in einer 40 °C-Nebelkammer geprüft wird.

In [Bok 04, Sie 00] wurde bereits eine deutliche Diskrepanz zwischen Außenlager und 40 °C-Nebelkammer für Beton dargestellt, der neben norddeutschem Kies (pessimaler Anteil) auch Puzzolane zur Vermeidung einer schädigenden AKR enthält. Dabei traten Schäden im Außenlager auf und in der 40 °C-Nebelkammer nicht. In Bild 2-29 sind die dort dargestellten Ergebnisse um Versuche mit hüttensandhaltigen Zementen ergänzt (20 bzw. 40 M.-% S, drei Hüttensande, weitere Informationen in [Syl 02]). Daraus wird deutlich, dass in Kombination mit norddeutschem Kies die bereits für Puzzolane bekannte Diskrepanz auch bei Verwendung von Hüttensand auftritt.

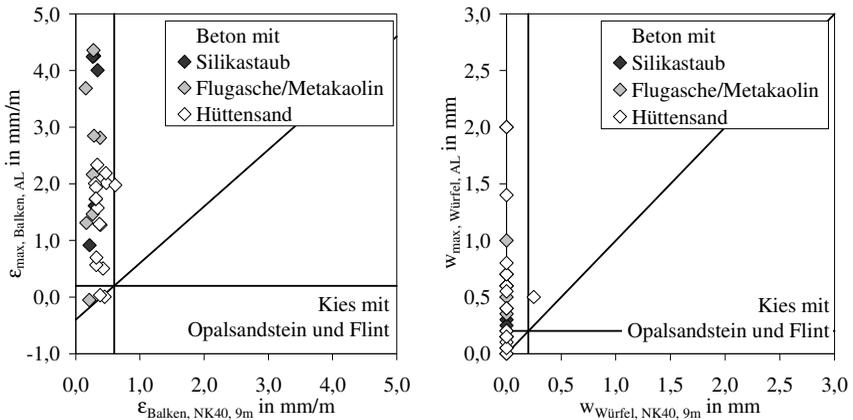


Bild 2-29: Dehnung (links) und Rissbildung (rechts) in der 40 °C-Nebelkammer (NK40) im Vergleich zur Außenlagerung (AL), Beton mit 15 M.-% norddeutschem Kies in der Korngruppe 2/8 mm sowie und Kompositzementen, die neben Klinker Hüttensand, Flugasche/Metakaolin oder Silikastaub enthalten

Anhand mikroskopischer Untersuchungen konnten die beobachteten Gefügeschäden unabhängig von der Art der weiteren Hauptbestandteile eindeutig auf eine schädigende AKR zurückgeführt werden. Überraschenderweise zeigte sich dabei auch, dass trotz ausbleibender Gefügeschädigung in der 40 °C-Nebelkammer eine veränderte Mikrostruktur des Opals mit isotropen Bereichen aufgetreten war [Sie 00]. Es ist anzunehmen, dass hier eine AKR stattgefunden hat, das gebildete ASH jedoch keinen ausreichenden osmotischen Druck aufbauen konnte.

Zusammenfassend ist deutlich geworden, dass für die Kombination norddeutscher Kies (Pessimum) plus hüttensand- und/oder puzzolanhaltigem Zement die Wahrscheinlichkeit sehr groß ist, dass eine mögliche schädigende AKR in der Praxis durch eine Lagerung bei 40 °C in der Nebelkammer nicht erkannt wird. Das in Abschnitt 2.4.3 dargestellte, deutsche Vorgehen zur Prüfung der Wirkung von Zementen auf eine AKR ist daher als sehr kritisch zu bewerten.

## Beton mit dichten alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen

In Bild 2-30 sind die Dehnung und die Rissbildung von 66 CEM I-Betonen mit dichter alkaliempfindlicher Gesteinskörnung dargestellt. Gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 zusammengesetzte Betone sind mit einem weißen Quadrat markiert (Abschnitt 2.4.2.4). Die übrigen Betone unterscheiden sich demgegenüber im Zementgehalt, w/z-Wert, Alkaligehalt des Zements oder der Kornzusammensetzung.

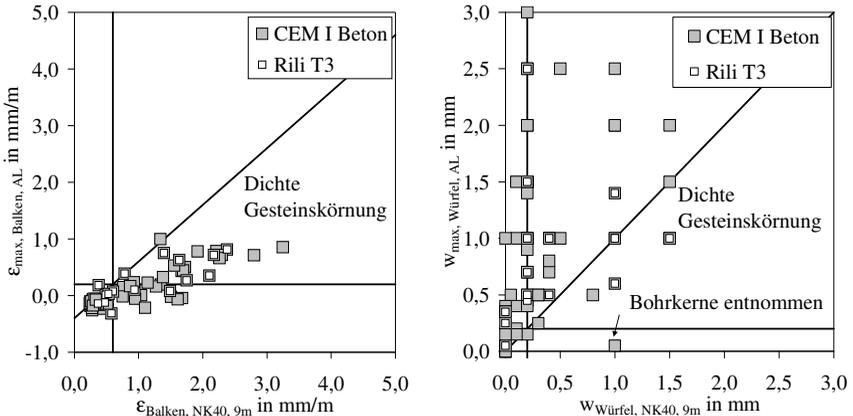


Bild 2-30: Dehnung (links) und Rissbildung (rechts) in der 40 °C-Nebelkammer (NK40) im Vergleich zur Außenlagerung (AL), CEM I Betone mit dichten Gesteinskörnungen

Anhand des Vergleichs der Dehnungen lässt sich ableiten, dass bezogen auf eine praxisnahe Lagerung in der 40 °C-Nebelkammer eine mögliche AKR in schlanken Betonbalken überschätzt wird. Die Auswertung der Rissbildung führt dagegen zu einer gegenteiligen Schlussfolgerung, da an den Würfeln im Außenlager mehrheitlich größere Rissweiten als in der 40 °C-Nebelkammer aufgetreten sind. Da die Rissweiten im Außenlager außerdem deutlich über das Maß für Schwindrisse an frei verformbaren Probekörpern hinaus gingen, lässt diese Beobachtung vermuten, dass in einer der beiden Lagerungen ein deutlich unterschiedliches Verhalten der verschiedenen Probekörper im Hinblick auf eine AKR auftritt. Das ließ sich anhand der vorliegenden Daten für die Probekörper im Außenlager nachweisen. Während eine große Anzahl an Würfeln eine ausgeprägte Rissbildung zeigte, blieb gleichzeitig eine Dehnung der Balken aus. Da Betone in der Praxis bis in Tiefen von mehr als 40 mm austrocknen können [Bra 05], ist als Ursache für dieses Verhalten anzunehmen, dass gegenüber den kompakten und großen Würfeln die Feuchte in den Betonbalken vielfach nicht mehr ausreicht, um eine signifikante Dehnung hervorzurufen.

Betone in der 40 °C-Nebelkammer werden anhand von Dehnung und Rissbildung zusammen beurteilt. Der jeweils ungünstigere Wert gibt die Bewertung vor [Deu 07]. Entsprechend muss, um die Güte des Prüfverfahrens beurteilen zu können, die strengere Einstufung aus beiden Kriterien dem Verhalten im Außenlager gegenübergestellt werden. In Bild 2-31 sind für eine Anzahl von 66 Portlandzementbetonen unterschiedlicher Zusammensetzung die aus solch einem Vergleich resultierenden Anteile an den möglichen Zuordnungen hinsichtlich einer Schädigung in Folge einer AKR dargestellt. Es zeigt, dass bei 86 % aller Betone die Bewertung gleich ist. Von den restlichen Betonen ist bei 12 % das unter baupraktischen Verhältnissen vorliegende AKR-Potential in der Nebelkammer unterschätzt worden. Vor allem Betone, deren Alkali Gehalt im Vergleich zur Betonzusammensetzung nach Alkali-Richtlinie Teil 3 ( $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ; 1,3 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$ ) deutlich geringer ist, zeigen dieses Verhalten. Ggf. wirkt sich hier eine etwaige Auslaugung aus.

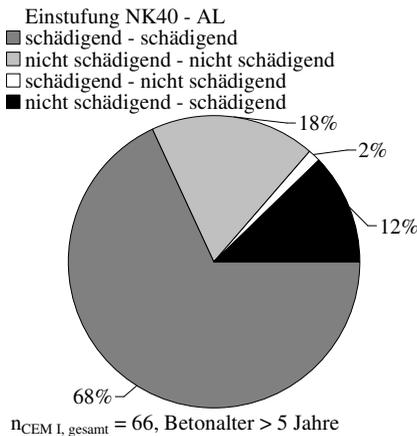


Bild 2-31: Vergleich der Bewertung von 66 unterschiedlich zusammengesetzten CEM I Betonen bei Lagerung in der 40 °C-Nebelkammer (NK40) und im Außenlager (AL)

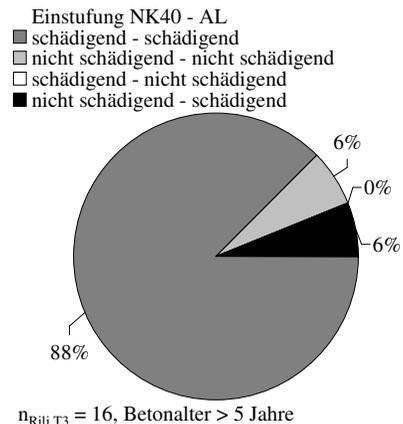


Bild 2-32: Vergleich der Bewertung von 16 Betonen gemäß Alkali-Richtlinie Teil in der 40 °C-Nebelkammer (NK40) und im Außenlager (AL)

In Bild 2-32 sind nur Betone berücksichtigt, die den Anforderungen der Alkali-Richtlinie Teil 3 genügen und mit denen die Alkaliempfindlichkeit der enthaltenen groben Gesteinskörnung bewertet wurde. Dem Bild ist zu entnehmen, dass bei einer Anzahl von insgesamt 16 Betonen in 94 % der Fälle bei der Prüfung in der 40 °C-Nebelkammer ein mit der Außenlagerung übereinstimmendes Ergebnis erzielt wird. Lediglich in einem Fall wurde die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung gegenüber dem Verhalten im Freien als zu gering eingeschätzt.

Betone mit dichten Gesteinskörnungen und hüttensand- oder puzzolanhaltigem Zement wurden bisher in nur sehr geringem Umfang untersucht. Jüngste Ergebnisse deuten an, dass es auch hier ggf. zu Diskrepanzen wie bei Verwendung von norddeutschem Kies kommen könnte [Bor 06]. Derzeit erscheint es jedoch trotz eines Betonalter von bis zu 10a zu früh, eine Bewertung vorzunehmen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass bei Beton mit dichter Gesteinskörnung, der gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 zusammengesetzt und geprüft wird (40 °C-Nebelkammer), das Verhalten unter praktischen Bedingungen mit guter Übereinstimmung wiedergibt. Dafür sind beide Kriterien gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 notwendig. Wird die Zusammensetzung des Betons im Vergleich zur Alkali-Richtlinie verändert, ist die Übertragbarkeit der Laborprüfergebnisse nicht zufrieden stellend. Vor allem bei reduziertem Zementgehalt im Beton oder Alkaligehalt im Zement, besteht die Gefahr, dass eine AKR unterschätzt wird.

## **2.5 Diskussion und Schlussfolgerungen**

Der Abschnitt 2.4.5 hat gezeigt, dass lediglich bei den Betonprüfverfahren zur Feststellung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen von einer zufrieden stellenden Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf baupraktische Verhältnisse ausgegangen werden kann. Der Grund dafür ist die von vornherein durchgeführte Kalibrierung der Prüfverfahren an der Baupraxis. Wird dagegen die Zusammensetzung der Betone gegenüber diesen Prüfanweisungen verändert, wie z.B. bei einer etwaigen Performance-Prüfung oder der Prüfung verschiedener Zementarten im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden AKR, deuten sich Diskrepanzen an. Dabei werden in praxisnahen Freilagern tendenziell größere Schäden in Form von Dehnungen und Rissbildungen an Probekörpern beobachtet als unter den vermeintlich strengeren Umgebungsbedingungen während der Laborprüfung. Besonders ausgeprägt ist dieses Verhalten offenbar, wenn in einem Beton gleichzeitig eine sehr alkaliempfindliche poröse Gesteinskörnung mit Pessimum und hüttensand- bzw. puzzolanhaltiger Zement eingesetzt werden.

Die Gefahr einer schädigenden AKR würde im Hinblick auf eine Performance-Prüfung mit den bisherigen Prüfvorschriften in der Laborprüfung tendenziell unterschätzt werden. Die Ursache kann einerseits darin liegen, dass eine AKR während einer Außenlagerung ggf. durch weitere Schädigungsmechanismen überlagert oder gefördert wird. Andererseits kann der Grund sein, dass Phänomene und Wechselwirkungen, die auf Grund der Lagerungsbedingungen bei der Laborprüfung auftreten, eine schädigende AKR nicht unterstützen sondern eher verhindern.

Als treibende Schädigungsmechanismen kommen Kalk-, Magnesia- und Sulfatreiben sowie eine Frostschädigung in Betracht. Da in den Forschungsvorhaben i.d.R. genormte Produkte verwendet wurden und im Außenlager keine äußere Sulfatzufuhr oder frühe Wärmebehandlung auftritt, kann ein Einfluss der ersten drei Phänomene ausgeschlossen werden. Doch auch der Einfluss einer Frostschädigung ist eher unwahrscheinlich. Zum einen sollte in vielen Fällen der relativ geringe w/z-Wert (siehe Bild 2-26) einen ausreichenden Widerstand auch ohne Luftporen garantieren. Zum anderen ist zu beobachten (hier nicht näher dargestellt), dass eine erhöhte Wasseraufnahme erst deutlich nach Einsetzen einer stetig ansteigenden Dehnung auftritt und nicht mit der Schädigung einhergeht, wie dies für eine Frostschädigung charakteristisch ist. Schließlich wurde auch bei Beton mit hohem Zementgehalt eine für eine Frostschädigung charakteristische Gefügeschädigung bisher an Dünnschliffen nicht festgestellt.

Somit ist anzunehmen, dass ein auf Grund der Bedingungen während der Laborprüfverfahren verringertes Schadensausmaß oder eine gar ausbleibende Gefügeschädigung zu der dargestellten Diskrepanz zwischen Außenlager und Laborprüfung führen. Folgende Wechselwirkungen können dazu beitragen:

1. Eine bei hoher Umgebungsfeuchte ggf. durch Auslaugung verringerte Alkalikonzentration in den Betonprobekörpern, für die sich eine Abhängigkeit von der Probekörpergröße andeutet (Abschnitt 2.4.2.3 und 2.4.2.4.).
2. Eine weitere Verdünnung der Alkalikonzentration infolge Wasseraufnahme und entsprechend höherem freien Wasseranteil im Probekörper (Abschnitt 2.4.2.4).
3. Der Einfluss der höheren Lagerungstemperatur während der Laborprüfung auf eine AKR und die Reaktion der Zementbestandteile (Abschnitt 2.3.3.4). Es besteht keine einheitliche Meinung darüber, ob die Reaktion weiterer Hauptbestandteile im Zement mehr beschleunigt wird als eine AKR (Abschnitt 2.4.3 und 2.4.4). Durch eine damit verbundene
  - a. schnellere Alkalibindung und Reduzierung der Alkalikonzentration (Abschnitt 2.3.2),
  - b. schnellere Gefügeverdichtung und entsprechend geringere Alkalidiffusion und Wasserpermeabilität (Abschnitt 2.3.3.2),
  - c. höhere Verbrauchsrate an CH (Abschnitt 2.3.3.3) und
  - d. Abnahme des pH-Werts (Abschnitt 2.2.3.1)

wäre eine schädigende AKR im Labor weniger wahrscheinlich.

4. Ein lagerungsabhängiges Verhalten des Reaktionsprodukts einer AKR in der Art, dass

- a. es bei sehr hoher Umgebungsfeuchte infolge starker Wasseraufnahme dünnflüssig wird und keinen Fülldruck aufbaut (Abschnitt 2.2.3.2),
- b. es bei höherer Temperatur schneller Wasser aufnimmt (Abschnitt 2.2.3.1), jedoch
- c. gleichzeitig an Viskosität verliert und so eher in die umgebenden Matrix eindringen kann, ohne zuvor Gefügeschäden zu verursachen (Abschnitt 2.1.4.3. und 2.2.3.1).

Die aufgezeigten Phänomene und Wechselwirkungen beruhen auf Vermutungen und indirekten Nachweisen und können bisher nur qualitativ benannt werden. Es liegen weder quantitative Daten dazu vor, in welchem Umfang einzelne Phänomene dahingehend wirken, dass eine schädigende AKR trotz ausreichendem Potential ausbleibt, noch kann die zeitlichen Abfolge der einzelnen Phänomene und damit ihr Zusammenwirken beschrieben werden.

## **3 Versuchsdurchführung**

### **3.1 Übersicht**

Entsprechend dem Untersuchungsansatz in Bild 1-2 gliedert sich das Versuchsprogramm in zwei Hauptabschnitte. Es ist in Tafel 3-1 unter Angabe der jeweiligen Zielstellungen dargestellt.

Im ersten Abschnitt werden zunächst die Auswirkungen auf die Alkalität der Porenlösung im Beton untersucht, die aus der Feuchtebeaufschlagung der Probekörper bei der Prüfung resultieren. Die ausgelaugte Alkalimenge und die Wasseraufnahme unterschiedlich zusammengesetzter Betone mit inertem Kalkstein als Gesteinskörnung (keine Beeinflussung durch Ausscheidung von Reaktionsprodukten) werden dazu bestimmt und bewertet. In ausgewählten Fällen wird die Auswirkung dieser Phänomene auch direkt an der Zusammensetzung der Porenlösung überprüft. Es werden drei verschiedene Lagerungsregimes in diese Untersuchungen einbezogen. Ein an die Außenlagerung im FIZ angelehntes reproduzierbares Lagerungsregime (SAL) dient dabei als Referenz, gegen die zwei weitere Regimes geprüft werden. Dies sind die Lagerungen gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 in der 40 °C-Nebelkammer (NK40) [Deu 07] und bei 60 °C über Wasser (Ü60) gemäß NF-P 18454. Da sich andeutet, dass die Probekörpergröße einen Einfluss hat, wird neben der Lagerung auch das Verhältnis zwischen Oberfläche A und Volumen V variiert. Ggf. erlaubt der sich abzeichnende lineare Zusammenhang eine Abschätzung der Auslaugung anderer Probekörpergrößen. Darüber hinaus wird der Einfluss einiger betontechnologischer Parameter untersucht, um zukünftig, insofern sich eine Auslaugung nicht ver-

meiden lässt, ihre Auswirkung auf eine AKR in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung beurteilen zu können.

Tafel 3-1: Überblick über das Versuchsprogramm

Ziel	Probe	Prüfgröße	Parameter	
Klärung der Voraussetzungen für eine AKR in Abhängigkeit von der/den	Feuchtebedingungen	Beton mit inertem Kalkstein	Ausgelaugte Alkalimenge Wasseraufnahme Zusammensetzung der Porenlösung (Alkaligehalt)	Lagerung (A/V) <sub>Probe</sub> z w/z Sieblinie Na <sub>2</sub> O <sub>Äq</sub> Zementart (-,S,V,D)
	Temperatur	Beton mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung	Dehnung, Rissbildung	Gesteinskörnungsart
			Zusammensetzung der Porenlösung (Alkali- und Sulfatgehalt, pH-Wert)	
		Inertem Kalkstein	Porosität	Zementart (-,S,V,D)
Zementstein	Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt	Lagerung Zementart (-,S,V,D)		
Klärung der Einflüsse auf den Aufbau von Quelldrücken bzgl.	Verhalten ASH	Wasserglas	Wasseraufnahme/Volumenzunahme Viskosität (Abschnitt 2.1.5.2)	Lagerung (SiO <sub>2</sub> /M <sub>2</sub> O) <sub>m</sub>
	Interaktion ASH - Gefüge	Mörtelprismen mit Wasserglasfüllung	Dehnung Visuelle Beurteilung (Risse, Ausscheidungen) REM	Lagerung (SiO <sub>2</sub> /M <sub>2</sub> O) <sub>m</sub> (Ca(OH) <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sub>m</sub>

Der Einfluss der Lagerungstemperatur auf das Auftreten einer AKR wird im zweiten Teil des ersten Untersuchungsabschnitts an Betonproben untersucht, die konserviert (-K) den zuvor genannten Lagerungen ausgesetzt werden. Als Referenz wird ein Beton mit alkalireichem Zement und inertem Kalkstein hergestellt. Anhand zweier Betone, bei denen ein Teil des Kalksteins durch alkaliempfindliche Gesteinskörnungen jeweils unterschiedlicher Reaktivität ausgetauscht wird, soll der Ablauf einer AKR verfolgt werden. Um den Beginn der Reaktion von Hüttensand (S), Flugasche (V) oder Silikastaub (D) als Zementhauptbestandteil zu überprüfen, wird in weiteren Betonen ein Teil des CEM I-Zements durch diese Stoffe ersetzt. Da sowohl eine AKR als auch die Reaktion der Hauptbe-

standteile den Alkaligehalt der Porenlösung beeinflussen, wird dieser als direkt vergleichbare Prüfgröße verwendet. Ergänzend wird einerseits die Dehnung von parallel hergestellten Betonprismen bestimmt, um eine ggf. auftretende AKR zu verifizieren. Andererseits wird die Reaktion der Hauptbestandteile zusätzlich anhand des verbrauchten Calciumhydroxidanteils in konserviert gelagertem Zementstein verfolgt (gleicher w/z-Wert wie im Beton). Insgesamt besteht damit die Möglichkeit, in Abhängigkeit der jeweiligen Temperaturregimes die Kinetik der Reaktionen miteinander zu vergleichen. Die zeitlichen Abläufe werden so dahingehend überprüft, ob sie unter Prüfbedingungen die Verhältnisse unter Normalbedingungen wiedergeben. Zusätzlich wird in Abhängigkeit der Temperaturregimes kontrolliert, inwieweit Unterschiede im Hinblick auf die Alkalität der Porenlösung, des CH-Anteils und der zusätzlich bestimmten Porositätskennwerte auftreten, die sich auf die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen auswirken können.

Im zweiten Untersuchungsabschnitt zum Aufbau von Quelldrücken wird zunächst die Wasseraufnahme gemahlener Stückenwassergläser als Modellsubstanz für frisch gebildetes sehr wasserarmes ASH untersucht. In erster Linie werden dabei Temperatur und relative Luftfeuchte verändert. Jedoch wird auch die Zusammensetzung der Wassergläser variiert, um zum einen den Einfluss verschiedener Alkaligehalte in der Porenlösung und damit im Reaktionsprodukt zu berücksichtigen und zum anderen Unterschiede zwischen den Alkaliarten herauszuarbeiten. Die Ergebnisse werden der Interpretation der weiteren Untersuchungen dienen. Die Entwicklung der Viskosität der Wassergläser wird hierfür nicht weiter untersucht; diesbezüglich wird auf die Ausführungen in Abschnitt 2.1.5.2 zurückgegriffen.

Abschließend wird auf die Interaktion zwischen Reaktionsprodukt und umgebender Matrix eingegangen. Dazu werden die gemahlene Stückenwassergläser in Mörtelprismen eingekapselt und diese anschließend verschiedenen klimatischen Bedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte) ausgesetzt. Für den weiteren Verlauf wird vorausgesetzt, dass die Wassergläser wie das Reaktionsprodukt einer AKR Wasser aufnehmen und ihr Volumen vergrößern [Kro 75]. Als Indiz für einen schädigenden Druckaufbau werden die resultierenden Dehnungen gemessen und etwaige Risse erfasst. Oberflächliche Ausscheidungen ohne Rissbildung deuten das Gegenteil, eine zu geringe Viskosität in Bezug zur umgebenden Matrix an. In einigen wenigen Versuchen werden auch Mörtelprismen mit Gemischen aus Wasserglas und CH-Pulver geprüft. Der Einfluss von Ca im Reaktionsprodukt einer AKR wird dadurch erfasst. Abschließend werden die anhand indirekter Untersuchungsparameter gewonnenen Ergebnisse mittels rasterelektronenmikroskopischer Analysen an ausgewählten Proben nachvollzogen.

## 3.2 Untersuchungen zur Induktionsphase einer AKR

### 3.2.1 Ausgangsstoffe

#### 3.2.1.1 Zement

Es wurden zwei in deutschen Zementwerken hergestellte CEM I-Zemente (CEM I (1,3), CEM I-NA) der Festigkeitsklasse 32,5 R bzw. 42,5 N für die Herstellung der Betone und Zementsteine eingesetzt. Ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften wurden entsprechend den Normen der Reihe DIN EN 196 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tafel A-1 zusammengestellt.

Zement CEM I (1,3) wies einen Alkaligehalt von 1,29 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$  auf. Dieser Wert liegt an der oberen Grenze der Alkaligehalte in deutschen CEM I-Zementen. Darüber hinaus entsprach er dem Zement, der für die Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 zu verwenden ist. Der Zement gewährleistet ein hohes Ausgangspotential für eine schädigende AKR. Dem gegenüber steht der Zement CEM I-NA, der mit einem Gesamtalkaligehalt von 0,54 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq}}$  die Bedingungen für einen NA-Zement gemäß DIN 1164-10 erfüllt. Seine Eigenschaften und das daraus resultierende Betonverhalten kennzeichnen in den Untersuchungen die Grenze, ab der von einer schädigenden AKR ohne Alkalizufuhr nicht mehr auszugehen ist.

Drei weitere Zemente wurden durch Mischen des Zements CEM I (1,3) mit einem Hüttensand (S), einer Flugasche (V) und einem Silikastaub (D) hergestellt. Die Zemente enthielten jeweils 20 M.-% Hüttensand bzw. Flugasche oder 10 M.-% Silikastaub. Sie entsprachen damit von der Zusammensetzung einem CEM II/A-S, CEM II/A-V bzw. CEM II/A-D nach DIN EN 197-1. Die relativ geringen Anteile an Hüttensand und Flugasche wurden gewählt, da sich bei diesen Größenordnungen auf Grund des größeren Umsatzes an CH [Sch 04] die Reaktion der Zementhauptbestandteile besser verfolgen lässt. Darüber hinaus ist die Zusammensetzung der Zemente so mit einigen der Betone vergleichbar, die im FIZ zu einem diskrepanten Verhalten geführt haben [Sie 00].

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Hauptbestandteile wurden nach den Normen der Reihe DIN EN 196 überprüft; die Ergebnisse sind in Tafel A-1 aufgeführt. Sie entsprachen den Anforderungen an Zementhauptbestandteile gemäß DIN EN 197-1.

Um zielsicher eine gleichmäßige Verteilung des sehr feinen Silikastaubs zu erzielen, musste der Silikastaub in Form einer Slurry mit 50 M.-% Feststoffanteil direkt dem Beton bzw. Zementleim zugegeben werden. Der Wasseranteil der Slurry wurde auf den w/z-Wert im Beton angerechnet.

### 3.2.1.2 Gesteinskörnungen

Es wurde i.d.R. ausschließlich inerte Kalkstein (KS) der Fraktionen 0/2, 2/8 und 8/16 mm mit einer Kornrohichte von 2,66 Mg/m<sup>3</sup> verwendet. Die Sieblinie des Gesteinskörnungsgemisches lag hauptsächlich in der Mitte des Bereichs A/B 16 gemäß DIN 1045-2:2001-07. Bei sehr leimreichen Betonen, aus denen Porenlösungen ausgepresst werden sollten, lag die Sieblinie des Korngemisches in der Mitte des Bereichs B/C 16.

In zwei Versuchen wurde ein Teil der inerten Gesteinskörnung gegen eine alkaliempfindliche Gesteinskörnung ausgetauscht. Der schnell reagierende Kies mit Opalsandstein und Flint (OF), der eine Kornrohichte von 2,60 Mg/m<sup>3</sup> aufwies und ein Pessimum besitzt [Bon 73, Bon 86, Sie 01], wurde zu 15 M.-% bezogen auf das Korngemisch in der Fraktion 2/8 mm eingesetzt. Der langsamer reagierende Splitt mit silifiziertem Kalkstein und Hornstein (SKH) ohne Pessimum [Bok 02, Bok 02a] wurde entsprechend den Angaben in der Alkali-Richtlinie Teil 3 (70 M.-% in der Fraktion 2/16 mm) verwendet. Die Kornrohichte der Gesteinskörnung SKH betrug 2,66 Mg/m<sup>3</sup>.

Tafel 3-2: Bezeichnung und Zusammensetzung der Betone

Beton Nr.	Zement	z	w/z	Gesteinskörnung	Sieblinie		
		kg/m <sup>3</sup>	-				
B1+B7	CEM I (1,3)	400	0,45	KS	A/B 16		
B2			0,55				
B3			0,35				
B4		500	0,45				
B5		300					
B6		400					
B8	CEM I-NA	500	0,55		KS	B/C 16	
B9							
B10							CEM II/A-S
B11							CEM II/A-V
B12							CEM II/A-D
B13							CEM I (1,3)
B14	SKH-KS	A/B 16					

### 3.2.1.3 *Zugabewasser*

Alle Betone und Zementleime wurden mit Wasser aus dem Düsseldorfer Leitungsnetz hergestellt.

### 3.2.2 *Zusammensetzung der Betone und Zementleime*

Es wurden insgesamt 14 verschiedene Betone hergestellt. Die Zusammensetzung der einzelnen Betone ist in Tafel 3-2 aufgeführt.

An den Betonen B1 bis B12 wurden die Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Feuchtebeaufschlagung durchgeführt. Die Kinetik der Reaktion der Hauptbestandteile sowie einer AKR wurde an den Betonen B8 bis B14 verfolgt. Zusätzlich wurden für diesen Teil der Untersuchungen 4 Zementleime hergestellt, deren Zusammensetzung dem Zementleim der Betone B8 und B10 bis B12 entsprach.

### 3.2.3 *Herstellung und Lagerung*

#### 3.2.3.1 *Herstellung der Betonproben*

Die Herstellung der Betone erfolgte in einem Labortellermischer. Dazu wurde zunächst die an Luft getrocknete Gesteinskörnung mit dem Zement sowie, wenn vorgesehen, Hüttensand bzw. Flugasche trocken vorgemischt (ca. 0,5 Minuten). Die Silikastaub-Slurry wurde dem Beton zusammen mit dem Anmachwasser zugegeben. Nach Zugabe aller Ausgangsstoffe wurde der Beton für weitere 2,5 Minuten gemischt. Der Frischbetontemperatur betrug ca. 20 °C.

Die Probekörper wurden in Stahlformen hergestellt. Je nach Konsistenz wurde der Beton entweder auf einem Rütteltisch oder durch Stochern verdichtet. Bei sehr steifen Betonen war teilweise eine Auflast erforderlich. Anschließend wurden die Probekörper für 24 h in den Formen bei 20 °C und vor Austrocknung geschützt gelagert.

Als Probekörper, an denen die Entwicklung der Wasseraufnahme, der Auslaugung, der Porenlösungskonzentration sowie der Porosität im Beton verfolgt werden sollte, wurden in Anlehnung an den Standtest [Hoh 03] für die Lagerungen SAL, SAL-K, NK40 und NK40-K (siehe Abschnitt 3.2.3.2) Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm verwendet. Um die Abhängigkeit der Auslaugung vom A/V-Verhältnis zu überprüfen, wurden aus Beton B7 für die Lagerungen SAL und NK40 zusätzlich Prismen mit den folgenden Abmessungen hergestellt:

- 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>
- 7,5 x 7,5 x 28 cm<sup>3</sup>
- 10 x 10 x 28 cm<sup>3</sup>
- 15 x 15 x 28 cm<sup>3</sup>

Auf Grund der für das französische Performance-Prüfverfahren vorgesehenen Edelstahlcontainer und dem geplanten Prüfumfang konnten die Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm für die Lagerungen Ü60 und Ü60-K (siehe Abschnitt 3.2.3.2) nicht eingesetzt werden. Deshalb kamen bei diesen Lagerungen Prismen mit den Abmessungen 7,5 x 7,5 x 14 cm<sup>3</sup> zum Einsatz. Um in einem Versuch den direkten Vergleich zwischen den Lagerungen zu ermöglichen, wurden aus Beton B7 zusätzliche Prismen mit den Abmessungen 7,5 x 7,5 x 28 cm<sup>3</sup> (gleiches Verhältnis A/V wie der 10-cm Würfel) für Lagerung Ü60 hergestellt.

Zur phänomenologischen Überprüfung einer schädigenden AKR in den Betonen B8 sowie B13 und B14 wurden für die Lagerungen SAL und NK40 Prismen mit den Abmessungen 10 x 10 x 50 cm<sup>3</sup> und für Lagerung Ü60 Prismen mit den Abmessungen 7,5 x 7,5 x 28 cm<sup>3</sup> verwendet. Die Probekörper entsprachen damit der Alkali-Richtlinie Teil 3 [Deu 07] bzw. der französischen Norm NF-P 18454.

Für die Festigkeitsprüfung wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm hergestellt.

### 3.2.3.2 Lagerung der Betonproben

Alle Betonprobekörper wurden 24 h nach Herstellung ausgeschalt. Die 15-cm-Würfel wurden anschließend bis zum Zeitpunkt der Prüfung nach dem Nationalen Anhang zu DIN EN 12390-2 gelagert. Alle weiteren Probekörper wurden entsprechend einer der folgenden Lagerungen weiter behandelt.

#### Simulierte Außenlagerung (SAL)

Da die Bedingungen im Außenlager für Betone unterschiedlichen Herstelldatums nicht vergleichbar gewesen wären, wurde ein Lagerungsregime zur Simulation der Außenlagerung entwickelt. Es umfasst folgende in Bild 3-1 dargestellte Abschnitte.

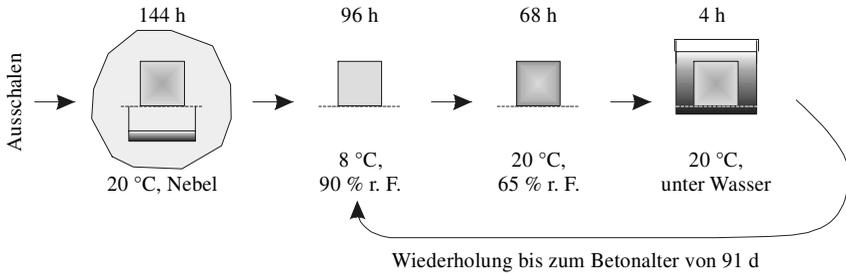


Bild 3-1: Lagerung SAL, Farbverlauf im Würfel kennzeichnet angenommenen Verlauf der Alkalikonzentration im Probekörper (dunklere Färbung entspricht höheren Konzentrationen)

Für die Unterwasserlagerung wurde destilliertes Wasser verwendet, das 28d, 56d und 91d nach Herstellung der Betonprobekörper erneuert wurde. Das Volumenverhältnis Probekörper zu Wasser betrug 1:3.

Neben einer möglichen Auslaugung von Alkalien während der Aufbewahrung der Proben in der Nebelkammer bei 20 °C ist bei Lagerung AL auch im weiteren Verlauf mit einer Reduzierung des Alkaligehaltes im Beton zu rechnen. Bei Lagerung SAL stellt die Lagerung bei 20 °C und 65 % r.F. eine Trockenperiode dar, in der sich an der Oberfläche der Probekörper Alkalihydroxide konzentrieren. Diese wurden, wie bei Regen, durch die nachfolgende Lagerung in destilliertem Wasser (4h) schnell gelöst und so dem Probekörper entzogen. Eine Sättigung des destillierten Wassers innerhalb der angegebenen Zeiträume konnte auf Grund der hohen Löslichkeit der Alkalihydroxide ausgeschlossen werden

### Simulierte AußenLagerung-Konserviert (SAL-K)

Für diese Lagerung wurden die Probekörper (nur 10-cm-Würfel) nach dem Ausschalen zunächst einzeln in 0,1 mm dicke PE-Folie eingeschweißt und anschließend je Herstellung zusammen in einen Weithalsbehälter gelegt, der luftdicht verschlossen wurde. Danach wurde der Behälter dem Temperaturregime der Lagerung SAL ausgesetzt.

### NebelKammer bei 40 °C (NK40)

Die Lagerung entspricht derjenigen nach Alkali-Richtlinie Teil 3. Die Probekörper wurden direkt nach dem Ausschalen in die Nebelkammer bei 40 °C gebracht. Dort lagerten sie grundsätzlich im gleichen Bereich der Nebelkammer – auf der obersten Regalebene – um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch abtropfendes Wasser von anderen Probekörpern oder ungleicher Temperaturverteilung zu vermeiden. Zwei 10-cm-Würfel je Beton wurden, wie in Bild 3-1 für die Nebelkammer bei 20 °C dargestellt, über einem Edelstahlbehälter gelagert, um darin das von den Probekörpern ablaufende Wasser aufzufangen.

### Nebelkammer bei 40 °C-Konserviert (NK40-K)

Die nach dem Ausschalen analog zu Lagerung SAL-K konservierten und in Weithalsbehälter aufbewahrten 10-cm-Würfel wurden einer konstanten Lagerungstemperatur von 40 °C gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 unterworfen.

### Über Wasser bei 60 °C (Ü60)

Die Lagerung wurde gemäß NF-P 18454, der Prüfvorschrift für das französische Performance-Prüfverfahren, durchgeführt. Nach dem Ausschalen wurden die Prismen in einem Edelstahlcontainer aufbewahrt und dieser auf einen Rost in einen Reaktor gestellt, dessen Raumluft über ein Wasserbad auf 60 °C geheizt wurde. Nach 27, 55, 69 und 83 Tagen wurde der Edelstahlcontainer aus dem Reaktor entnommen, für 24 h in eine Nebelkammer bei 20 °C und anschließend wieder in den Reaktor gestellt.

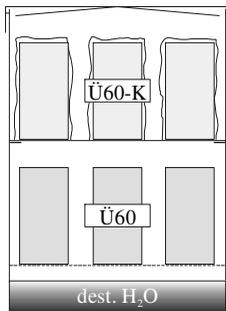


Bild 3-2: Konfiguration des Edelstahlbehälters für die Lagerungen Ü60 bzw. Ü60-K

### Über Wasser bei 60 °C-Konserviert (Ü60-K)

Die nach dem Ausschalen analog zu Lagerung SAL-K in PE-Folie eingeschweißten Prismen wurden gemeinsam mit den Probekörpern der Lagerung Ü60 dem Temperaturregime gemäß NF-P 18454 ausgesetzt (vgl. Bild 3-2).

#### *3.2.3.3 Herstellung der Zementleime und Lagerung der Zementsteinproben*

Die Herstellung der Zementleime erfolgte nach den Vorgaben in DIN EN 196-3. Unmittelbar nach Herstellung der Leime wurden diese möglichst frei von Luft einschließen bis zum Rand in 16 ml Polystyrolröhrchen gefüllt und mit einem Deckel verschlossen. Um den spannungsfreien Austritt überschüssigen Zementleims zu ermöglichen, wurde zuvor ein Loch von 1 mm Durchmesser in die Deckel gebohrt. Im Anschluss wurde der Deckel versiegelt und die Probe zur Vermeidung von Entmischungen für 24 h im Rhönrad rotiert.

Abschließend wurden die konserviert in den Polystyrolröhrchen gelagerten Zementsteine ebenfalls in Weithalsbehälter gelagert und bis zum Prüftermin analog einer der Lagerungen SAL-K, NK40-K oder Ü60-K für die Betonproben behandelt.

### 3.2.4 Probenpräparation und Untersuchungsmethoden

#### 3.2.4.1 Frischbetoneigenschaften

Es wurde routinemäßig 10 Minuten nach Zugabe des Wassers die Frischbetonrohddichte ( $\rho_R$ ) und der Luftgehalt (LP) mittels Druckausgleichsverfahren im Luftporenopf bestimmt. Weiterhin wurde das Ausbreitmaß ( $d_{10}$ ) des Betons überprüft. Bei zu steifer Konsistenz wurde stattdessen das Verdichtungsmaß ( $c_{10}$ ) ermittelt. Alle Prüfungen wurden gemäß der Normenreihe DIN EN 12350 durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tafel A-2 zusammengestellt.

#### 3.2.4.2 Festbetonrohddichte und -festigkeit

An den Würfeln mit einer Kantenlänge von 15 cm wurde nach 28d die Rohddichte ( $\rho_{R,28}$ ) und Druckfestigkeit ( $f_{c,28}$ ) des Betons nach DIN EN 12390 ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tafel A-2 aufgeführt.

#### 3.2.4.3 Wasseraufnahme/-abgabe des Betons

Die Menge des freien Wassers im Beton beeinflusst die Ionenkonzentration in der Porenlösung. Um diesbezüglich den Einfluss der Prüfbedingungen abschätzen zu können, wurden die Massen der Probekörper, die für die nicht konservierte Lagerung vorgesehen waren, unmittelbar nach dem Ausschalen und vor einer Prüfung nach Abschnitt 3.2.4.4 bestimmt. Daraus wurden die Wasseraufnahme absolut ( $\Delta m_{WA}$ ) und prozentual bezogen auf das Ausgangsgewicht (WA) berechnet.

$$\Delta m_{WA} = m_t - m_0 \text{ [g]} \quad \text{Gl. 3-1}$$

$$WA = \frac{\Delta m_{WA}}{m_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad \text{Gl. 3-2}$$

mit  $m_t$       Masse des Probekörpers zum Prüfzeitpunkt t in g  
 $m_0$       Masse des Probekörpers nach dem Ausschalen in g

Die so ermittelten Werte sind je Beton in den Tafeln A-3 bis A-18 enthalten.

#### *3.2.4.4 Auslaugung der Betonprobekörper*

Bei den in Abschnitt 3.2.3.2 dargestellten Lagerungen SAL, NK40 und Ü60 waren die Probekörper zumindest temporär sehr feuchten Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Um eine damit verbundene Auslaugung von Alkalien aus den Probekörpern zu erfassen, wurde wie folgt vorgegangen.

Nach 7, 28, 56 und 91d wurde die Masse  $m_H$  des von den Probekörpern abgetropften Wassers (Lagerung SAL und NK40) und das Wasser der Wasserbäder für die Lagerung unter Wasser (Lagerung SAL) sowie das Wasser im Edelstahlcontainer (Lagerung Ü60) gravimetrisch bestimmt. Mit einer Spritze wurde für eine chemische Analyse nach Abschnitt 3.2.4.6 eine Teilprobe von den jeweiligen Wässern entnommen und bis zur Analyse in luftdicht verschließbaren PP-Zentrifugenröhrchen bei 20 °C gelagert. Um eine Carbonatisierung zu vermeiden wurden, die Röhrchen mit Argon gespült.

#### *3.2.4.5 Gewinnung der Porenlösung*

Die Zusammensetzung der Porenlösung sollte im Betonalter von 1, 3, 7, 28, 56 und 91d ermittelt werden. Durch Vorversuche war bekannt, dass mit dem von Longuet et al entwickelten Auspressverfahren [Lon 73] über diesen Zeitraum nur bei sehr leimreichen Betonen ausreichend Porenlösung zur Analyse gewonnen werden kann. Um darüber hinaus eine Anbindung an bestehende Untersuchungen zu gewährleisten (Abschnitt 2.4.5.2), wurden die Betone für diese Untersuchungen mit einem Zementgehalt von 500 kg/m<sup>3</sup> und einem w/z-Wert von 0,55 hergestellt.

Je Prüftermin wurde ein 10-cm-Würfel unter einer Presse zerkleinert. Die Teilprobe zum Auspressen der Porenlösung wurde aus dem Kern der zerkleinerten Probe entnommen und in den Drucktopf der in Bild 3-3 dargestellten Auspressvorrichtung gegeben. Um zu vermeiden, dass beim Auspressen Porenlösung nach oben austritt, wurde eine Teflonscheibe über dem Prüfgut in die Bohrung eingesetzt. Zur Führung des Stempels wurde über der Teflonscheibe eine Stahlscheibe angeordnet. Die Porenlösung wurde über einen an der seitlichen Bohrung der Bodenplatte angebrachten Teflonschlauch in ein mit Argon gespültes Auffanggefäß geleitet.



Bild 3-3: Auspressvorrichtung zur Gewinnung der Porenlösung

Das Auspressen erfolgte unter einem maximalen Druck von 780 Mpa. Wie Vorversuche gezeigt haben, ist die maximal gewinnbare Lösungsmenge von der Belastungsgeschwindigkeit und dem Alter der Proben abhängig. Für Proben älter als 16 h hat sich folgendes Belastungsregime als besonders günstig erwiesen: bis zum Druck von 260 Mpa eine Belastungsgeschwindigkeit von 20 kN/s, von 260 Mpa bis zum Maximaldruck eine Belastungsgeschwindigkeit von 1,7 kN/s.

Um in der Porenlösung enthaltene Zementsteinpartikel zu entfernen, wurden die Lösungen unmittelbar nach dem Auspressen über einen Teflon-Membranspritzenfilter mit einer Porengröße von  $0,45\ \mu\text{m}$  direkt in ein luftdicht verschließbares PP-Röhrchen filtriert. Zur Vermeidung einer Carbonatisierung wurde Argon in die Röhrchen eingeleitet und die Probe bis zu Prüfung nach Abschnitt 3.2.4.6 bei  $20\ ^\circ\text{C}$  gelagert.

#### 3.2.4.6 Chemische Analysen

Die wässrigen Proben gemäß Abschnitt 3.2.4.4 sowie die ausgepressten Porenlösungen wurden auf ihren Gehalt an Na- und K-Ionen untersucht. An den Porenlösungen wurde z.T. zusätzlich der Gehalt an  $\text{SO}_4^{2-}$ -Ionen bestimmt. Die Bestimmung erfolgte mit einem Ionenchromatographen DIONEX DX 500. Die Kalibration für die Analysen lag bei 1 bis 50 mg/l. Auf Grund der z.T. sehr hohen Alkalikonzentrationen mussten die analysierten Lösungen um einen Faktor 100 bis 1000 verdünnt werden. Um den Verdünnungsfehler zu minimieren, erfolgte die Messung der Lösung bei zwei unterschiedlichen Verdünnungsstufen. Die Ergebnisse der beiden Analysen wurden gemittelt und die jeweilige Konzentration in mg/l angegeben.

Aus der jeweils bestimmten Wassermasse  $m_H$  nach Abschnitt 3.2.4.4 und der entsprechenden Konzentration  $c$  an Na bzw. K der daraus entnommenen Teil-

probe wurde die Masse  $m_K$  an ausgelaugten Alkalien (hier dargestellt für K) je Zeitraum wie folgt berechnet.

$$m_K = c_K \cdot m_H / \rho_H \text{ [mg]} \quad \text{Gl. 3-3}$$

mit  $c_K$  K-Konzentration des aufgefangenen Wassers in mg/l  
 $m_H$  Masse des aufgefangenen Wassers in g  
 $\rho_H$  zu 1,0 g/ml angenommene Dichte des Wassers

Die Berechnung für die ausgelaugte Masse an Na erfolgte analog. Die je Zeitintervall bestimmten Mengen sind in den Tafeln A-3 bis A-18 enthalten.

Die einzelnen Ionenkonzentrationen der Porenlösungen  $c_{\text{cal},X}$  sind in den Tafeln A-20 bis A-26 zusammengestellt. Sie sind dort in mmol/l angegeben. Die gemessenen Werte wurden dazu wie folgt umgerechnet.

$$c_{\text{cal},X} = c_{\text{gem},X} / u_X \text{ [mmol/l]} \quad \text{Gl. 3-4}$$

mit  $c_{\text{gem},x}$  gemessene Konzentration für Kation/Anion X in mg/l  
 $u_X$  Molmasse u für Kation/Anion X in g/mol.

An einigen der ausgepressten Porenlösungen wurde zusätzlich der pH-Wert titrimetrisch gegen HCl als Indikator bestimmt. Die Titration erfolgte mit dem Titrator DL 55 der Fa. Mettler Toledo. Die Ergebnisse sind ebenfalls in den Tafeln A-20 bis A-26 enthalten.

### 3.2.4.7 *Abstoppen der Hydratation*

Nach 1, 3, 7, 28, 56 und 91d wurden die erhärteten Zementsteinproben dem Polystyrolröhrchen entnommen, mechanisch zerkleinert, mit Aceton bedeckt und analysefein aufgemahlen. Das Aceton wurde mit einer Vakuumpumpe über einen Büchnertrichter mit Blaubandfilter abgesaugt. Nachfolgend wurden die Proben dreimal mit Diethylether gespült und anschließend gemörsert, damit der Diethylether verdampft und die Proben analysenfein vorliegen. Die so abgestoppten Proben wurden mit Argon überspült und luftdicht verschlossen bis zur Prüfung gelagert.

### 3.2.4.8 *Simultane Thermoanalyse*

Bei der simultanen Thermoanalyse wird an einer Probe während eines definierten Aufheizprogramms neben der Gewichtsänderung mit einer Thermowaage (Thermogravimetrie) die Wärmefreisetzung bzw. die Wärmeaufnahme (Differenz-Thermoanalyse) bestimmt. Dadurch lassen sich temperaturabhängige Pha-

senumwandlungen und Phasenzersetzungen qualitativ und zum Teil quantitativ erfassen. Die Untersuchungen erfolgten mit dem Gerät STA 501 der Fa. Bähr.

Für die Untersuchungen wurden ca. 80 mg des nach Abschnitt 3.2.4.7 abgestoppten Zementsteins in einen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Tiegel eingewogen und mit 10 K/min in  $\text{N}_2$ -Atmosphäre bis auf eine maximale Temperatur von  $1000^\circ\text{C}$  aufgeheizt. Eine Temperatur von  $105^\circ\text{C}$  wurde beim Aufheizen eine Stunde gehalten, um eventuell anhaftende Diethyletherreste oder Wasser zu entfernen.

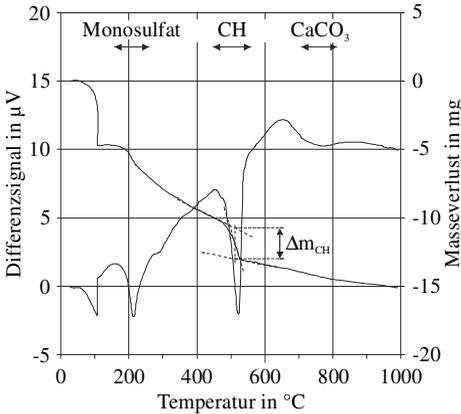


Bild 3-4: STA-Analyse eines hydratisierten Portlandzements

Die Bestimmung des CH-Gehalts der Proben erfolgte durch Auswertung des Gewichtsverlusts im Bereich zwischen  $450$  und  $600^\circ\text{C}$  (Bild 3-4), in dem die Entwässerung des CH erfolgt [Mar 88]. Der auf die geglühte Substanz bezogene CH-Gehalt berechnet sich aus dem Massenverlust  $\Delta m_{\text{CH}}$  nach folgender Formel:

$$\text{CH} = \frac{u_{\text{CH}} \cdot \Delta m_{\text{CH}}}{m_{1000}} \cdot 100 = \frac{4,11 \cdot \Delta m_{\text{CH}}}{m_{1000}} \cdot 100 \quad [\text{g}/100\text{g Z}] \quad \text{Gl. 3-5}$$

mit  $u_{\text{CH}}$  molare Masse  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in g/mol  
 $u_{\text{H}}$  molare Masse  $\text{H}_2\text{O}$  in g/mol  
 $\Delta m_{\text{CH}}$  gemäß Bild 3-4 bestimmter Massenverlust an CH in mg  
 $m_{1000}$  Masse der Probe nach dem Glühen bei  $1000^\circ\text{C}$  in mg

Die Ergebnisse der STA-Untersuchungen sind Tafel A-27 zusammengefasst.

### 3.2.4.9 Quecksilberdruckporosimetrie

Der Einsatz weiterer Hauptbestandteile wirkt sich deutlich auf die Gefügewicklung und –eigenschaften aus. Um den zusätzlichen Einfluss unterschiedlicher Lagerungsbedingungen zu erfassen, wurden im Betonalter von 7d und 91d von den gemäß Abschnitt 3.2.4.5 mechanisch zerkleinerten Betonwürfeln Teilproben der Betonmörtelmatrix zur Bestimmung der Porenradieneingangsverteilung entnommen. Anschließend wurde die Probe prüfgerecht zerkleinert und für 24 h bei  $10^{-3}$  mbar über Silika-Gel vakuumgetrocknet.

Die Porenradieneingangsverteilung wurde mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie (Hg-Porosimetrie) bei einer Prüftemperatur von 20 °C bestimmt. Es wurde das „Porosimeter 2000 WS“ der Fa. Fision Instruments eingesetzt. Bei der Prüfung wird Quecksilber mit einem Druck von bis zu 200 Mpa in die Poren einer Probe eingepresst. Dabei ist der aufgebrachte Druck umgekehrt proportional zur Porenöffnung, in die das Quecksilber eindringt. Über die Washburn-Gleichung können unter Annahme zylinderförmiger Poren die den jeweiligen Drücken entsprechenden Porenradien berechnet und somit eine Größenverteilung erstellt werden [Coo 99]. Unter Voraussetzung eines Randwinkels zwischen Quecksilber und Mörtelmatrix von  $141,3^\circ$  sowie einer Oberflächenspannung des Quecksilbers von  $0,48 \text{ N/mm}^2$  ergab sich eine Porenradieneingangsverteilung im Bereich von ca.  $0,004$  bis  $6 \mu\text{m}$ .

### 3.2.4.10 Dehnung von Betonprismen

Die Längenänderung von Betonbalken mit den Abmessungen  $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$  (Lagerung SAL bzw. NK40) wurde gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 bestimmt (Messung am  $40^\circ \text{C}$  warmen Probekörper). Entsprechend der Anordnung der Messmarken auf den Seitenflächen wurde die Dehnung zum Zeitpunkt  $t$  ( $\epsilon_t$ ) wie folgt aus den Messwerten berechnet.

$$\epsilon_t = \frac{(l_{1,t} - l_{1,1d}) + (l_{2,t} - l_{2,1d})}{2} \cdot \frac{1000}{L} \quad [\text{mm/m}] \quad \text{Gl. 3-6}$$

- mit  $l_{1,1d}; l_{2,1d}$  Abstand der Messmarken auf Seitenfläche 1 bzw. 2 im Betonalter von  $t = 1d$ , Ablesung in mm  
 $l_{1,t}; l_{2,t}$  Abstand der Messmarken auf Seitenfläche 1 bzw. 2 im Betonalter von  $t$  [d], Ablesung in mm  
 $L$  nomineller Abstand der Messmarken

Die Messmarken der Betonprismen mit den Abmessungen  $7,5 \times 7,5 \times 28 \text{ cm}^3$  für Lagerung Ü60 wurden bei der Herstellung mit einbetoniert. Sie wurden jeweils zentrisch auf den Stirnflächen angeordnet. Die Längenänderung der

Prismen wurde gemäß NF P 18454 ermittelt (24 h Vorlagerung bei 20 °C) und die Dehnung ( $\epsilon_{60,t}$ ) aus den Messwerten wie folgt berechnet.

$$\epsilon_{60,t} = (l_{60,t} - l_{60,1d}) \cdot \frac{1000}{L} \text{ [mm/m]} \quad \text{Gl. 3-7}$$

mit  $l_{60,1d}$  Abstand zwischen den Messmarken im Betonalter von  $t = 1d$ ,  
Ablesung in mm  
 $l_{60,t}$  Abstand zwischen den Messmarken im Betonalter von  $t$  [d],  
Ablesung in mm  
 $L$  nomineller Abstand der Messmarken

Die Dehnung wurde jeweils an mindestens zwei Balken einer Herstellung überprüft und die Mittelwerte daraus gebildet.

### **3.3 Untersuchungen zur Schädigungsphase einer AKR**

#### *3.3.1 Ausgangsstoffe*

##### *3.3.1.1 Zement*

Für die Herstellung der Mörtelprismen wurde der Zement CEM I-NA gemäß Abschnitt 3.2.1.1 verwendet. Ausschlaggebend war der niedrige Alkaligehalt. Ein nicht auszuschließendes Eindringen von Alkalien aus der Porenlösung in das eingekapselte Wasserglas und eine Beeinflussung des spezifischen Wasserglasverhaltens wurde dadurch weitgehend minimiert.

##### *3.3.1.2 Sand*

Als Gesteinskörnung zur Herstellung des Mörtels wurde Rheinsand der Fraktion 0/2 mm aus dem Düsseldorfer Raum verwendet.

##### *3.3.1.3 Wasser*

Als Anmachwasser für den Mörtel wurde Wasser aus dem Düsseldorfer Leitungsnetz eingesetzt.

### 3.3.1.4 Wassergläser

Die Zusammenstellung von Analysen an Reaktionsprodukten einer AKR in [Ido 61, Kro 75] zeigen, dass weitgehend reines ASH ( $\text{CaO} + \text{MgO} < 5 \text{ M.-%}$ ) ein Massenverhältnis  $\text{SiO}_2/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  von etwa 2,0 bis 4,5 aufweist. Dabei überwiegt das  $\text{Na}_2\text{O}$  bei den Alkalien. Das ist zurückzuführen auf die Alkaliverhältnisse in dänischen und amerikanischen Zementen. Im Allgemeinen liegt in europäischen und deutschen Zementen ein Verhältnis von  $\text{Na}_2\text{O}:\text{K}_2\text{O}$  von etwa 1:4 bis 1:10 vor [Loc 00]. Bei Verwendung dieser Zemente ist demnach mit einem höheren Kaliumgehalt in den Reaktionsprodukten einer AKR zu rechnen.

Aus den verfügbaren Stückenwassergläsern der Fa. Cognis Silicates wurden für die Untersuchungen drei Natron- und zwei Kaliwassergläser ausgewählt. Ihre chemische Zusammensetzung sowie das Gewichts- und Molverhältnis  $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O}$  ( $\text{M} = \text{K}, \text{Na}$ ) sind in Tafel A-28 angegeben. Die Natronwassergläser bilden hinsichtlich des Verhältnisses  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$  weitestgehend den Bereich der zuvor dargestellten Zusammensetzungen aus der Praxis ab. Die beiden Kaliwassergläser sind mit den beiden kieselsäurereichereren Natronwassergläsern auf Grund fast identischer molarer Verhältnisse  $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O}$  direkt vergleichbar. Die Wassergläser wurden vor Auslieferung durch Cognis Silicates gemahlen und verbleibende grobe Partikel durch eine Siebung ( $250 \mu\text{m}$  Maschenweite) entfernt.

### 3.3.1.5 Calciumhydroxid (CH)

Es wurde chemisch reines Calciumhydroxidpulver (Trockenlöschung) der Fa. Carl Roth GmbH & Co. KG verwendet.

## 3.3.2 Probenpräparation

### 3.3.2.1 Herstellung der Gemische aus Wasserglas und CH

Um zu überprüfen, inwiefern CH für den Aufbau von Fülldrücken erforderlich ist, wurden aus den gemahlten Wassergläsern und dem CH-Pulver Gemische hergestellt. Das molare Verhältnis  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  (C/S) zwischen den Ausgangsstoffen betrug im Großteil der Gemische 0,2. In ausgewählten Fällen wurde auch ein Verhältnis von 0,4 und 0,8 eingestellt.

Für den Mischvorgang wurde eine entsprechende Menge der beiden Ausgangsstoffe in einen luftdicht verschließbaren Kunststoffbecher gegeben, dieser in einen Eirich-Intensivmischer eingespannt und die Ausgangsstoffe 15 Minuten gemischt.

### 3.3.2.2 Zusammensetzung und Herstellung der Mörtelprismen

Die Mörtelprismen wurden in Anlehnung an DIN EN 196-1 hergestellt. Auf Grund der erforderlichen Mörtelmenge wurden abweichend von der Norm zuerst Sand und Zement in einem Labortellermischer kurz vorgemischt. Anschließend wurde das Wasser zugegeben und der weitere Mischvorgang wie in der Norm angegeben durchgeführt.

Nach dem Ausschalen der Prismen im Alter von 1d wurden die Prismen bis zum Alter von 21d unter Wasser bei 20 °C gelagert. Anschließend wurden sie bis zur weiteren Präparation im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte aufbewahrt, um sie auszutrocknen. Vorversuche hatten gezeigt, dass für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche ein Zeitraum von 10d ausreicht.

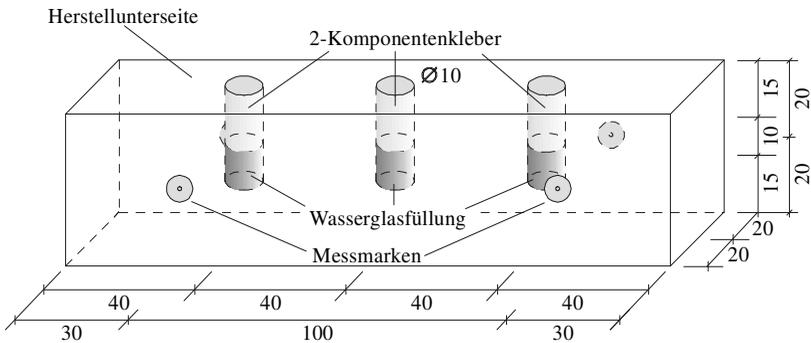


Bild 3-5: Präparation eines Mörtelprismas, Angaben in mm

Um die Schädigungsphase einer AKR und damit das Verhalten ihres Reaktionsprodukts in einer porösen Matrix unabhängig von der normalerweise vorab ablaufenden AKR näher zu simulieren, erfolgte nach 32d die endgültige Präparation der Mörtelprismen. Die Modellschubstanz, das gemahlene Wasserglas, wurde so in die Mörtelmatrix eingebracht, dass zum einen eine gleichmäßige Einwirkung der Umgebungsbedingungen garantiert werden konnte (Anordnung im Mittelpunkt des Prismenquerschnitts). Andererseits wurde angestrebt, nicht nur von einem Schadensereignis je Prisma abhängig zu sein. Deshalb wurden mittig auf der Herstellunterseite in Prismenlängsrichtung im Abstand von 40 mm drei Löcher mit einem Durchmesser von 10 mm und 25 mm Tiefe gebohrt (Bild 3-5). Anschließend wurden die Bohrlöcher mit Druckluft gereinigt und auf den Seitenflächen Messmarken appliziert, um die etwaig eintretende Gefügeschädigung mittels Messung des Abstands der Messmarken zu verfolgen. Für die Füllung der untersten 10 mm der Bohrlöcher waren etwa 1,5 g gemahlene Stücke Wasserglas erforderlich. Dieses wurde mit einem Trichter in die Bohrlöcher eingefüllt und, um eine gleichmäßige Verdichtung des gemahlene Wasserglases für alle Versuche zu gewährleisten, durch 15 Schläge mit einem

manuell bedienbaren Miniproctorhammer (200g Fallgewicht, 100 mm Fallhöhe) verdichtet. Zur Kontrolle der verbleibenden Bohrlochtiefe war am Fallgestänge eine Kerbe in einer Höhe von 15 mm angebracht. Abschließend wurde die Bohrung mit einem 2-Komponentenkleber verschlossen.

### 3.3.3 Lagerung

Durch die Untersuchungen sollte die Abhängigkeit des durch ASH verursachten Schädigungsgrads von den Umgebungsbedingungen geklärt werden. Entsprechend wurden zum einen die Temperatur bei einer konstant hohen relativen Luftfeuchte und zum anderen die relative Luftfeuchte bei einer konstanten Temperatur variiert. Darüber hinaus wurden Mörtelprismen den Lagerungen NK40 und Ü60 (Abschnitt 3.2.3.2) ausgesetzt. Die Herstellerseite der Prismen zeigte dabei stets nach unten. Tafel 3-3 gibt einen Überblick über die Lagerungsarten.

Tafel 3-3: Lagerung der Mörtelprismen und Wassergläser

Bezeichnung	Beschreibung	Proben
KR20	im KlimaRaum bei T = 20 °C und einer r.F. ≈ 65 %	WG
BC20	im Exsikkator bei 20 °C über ges. BariumChloridlösung (r.F. ≈ 82 %)	WG, MP
KB20	im Exsikkator bei 20 °C über ges. KaliumBromidlösung (r.F. ≈ 91 %)	WG, MP
Ü20	im Exsikkator/Edelstahlbehälter bei 20 °C Über Wasser (r.F. ≈ 100 %)	WG, MP
NK20	in der NebelKammer bei 20 °C (r.F. > 100 %)	MP
Ü8	im Edelstahlbehälter bei 8 °C Über Wasser (r.F. ≈ 100 %)	MP
Ü40	im Exsikkator/Edelstahlbehälter bei 40 °C Über Wasser (r.F. ≈ 100 %)	WG, MP
NK40	in der NebelKammer bei 40 °C (r.F. > 100 %)	MP
Ü60	im Exsikkator/Edelstahlbehälter bei 60 °C Über Wasser (r.F. ≈ 100 %)	WG, MP
WG = Wassergläser MP = Mörtelprismen		

### 3.3.4 Umfang der Mörtelprimentests

Die untersuchten Kombinationen der Wasserglasgemische in den Mörtelprismen und die Lagerungsart gehen aus Tafel 3-4 hervor.

Tafel 3-4: Umfang der Mörtelprimentests zum Aufbau von Quelldrücken

Molare Verhältnisse			Lagerung							
SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /K <sub>2</sub> O	CaO/SiO <sub>2</sub>	NK20	NK40	Ü8	Ü20	Ü40	Ü60	BC20	KB20
4,13		0,0	X	X		X	X	X		
		0,2		X						
		0,4		X						
		0,8		X						
	4,15	0,0	X	X		X	X	X		
		0,2		X						
		0,4		X						
		0,8		X						
3,36		0,0	X	X	X	X	X	X	X	X
		0,2	X	X				X		
	3,37	0,0	X	X	X	X	X	X	X	X
		0,2	X	X				X		
2,12		0,0	X	X		X	X	X	X	X
		0,2	X	X				X		
		0,4		X						
		0,8		X						

### 3.3.5 Untersuchungsmethoden und -verfahren

#### 3.3.5.1 Korngrößenverteilung

Es war anzunehmen, dass die Wasseraufnahme der als Pulver verwendeten Wassergläser auch von deren spezifischer Oberfläche und damit von der Korngrößenverteilung beeinflusst wird. Um einen etwaigen Einfluss abschätzen zu können, wurde letztere mittels eines Lasergranulometers (Cilas) von allen Wassergläsern bestimmt. Als Suspensionsmedium diente dabei Ethanol.

### 3.3.5.2 Wasseraufnahme

Um prinzipielle Zusammenhänge hinsichtlich der Wasseraufnahme und damit des Quellverhaltens der Wassergläser festzustellen, wurden je Wasserglas Proben von 5 g lose in PE-Becher mit einem Innendurchmesser von ca. 3 cm gefüllt. Die Becher mit den Proben wurden anschließend gemäß den Angaben in Tafel 3-3 gelagert.

Die Wasseraufnahme der Proben wurde wöchentlich bis zum Alter von 56d gravimetrisch ermittelt. Die prozentuale Zunahme bezogen auf die Ausgangsmenge wurde berechnet.

### 3.3.5.3 Dehnung

Die Referenzmessung des Abstandes der Messmarken erfolgte mit einem Setzdehnungsmesser nach Präparation der Prismen (32d nach Herstellung der Mörtel). Die weiteren Messungen erfolgten bei Lagerungstemperaturen  $\geq 40\text{ °C}$  bis zu einer Lagerungsdauer von 5 Wochen im Abstand von drei bzw. vier Tagen, anschließend bis zu drei Monaten wöchentlich und danach bis zu einem halben Jahr etwa vierzehntägig. Die bei  $20\text{ °C}$  und  $8\text{ °C}$  gelagerten Prismen wurden von Beginn an wöchentlich und weiterhin wie zuvor beschrieben geprüft. Um den Einfluss der Temperaturdehnung bei Lagerungstemperaturen  $\neq 20\text{ °C}$  zu eliminieren, wurden die entsprechenden Proben vor der Messung für 4h bei  $20\text{ °C}$  vorgelagert. Die Dehnung wurde aus den im Anschluss gemessenen Werten gemäß Gl. 3-6 berechnet, wobei die Referenzmessung hier nicht nach 1d sondern 32d erfolgte.

### 3.3.5.4 Augenscheinliche Beurteilung

Zu den Prüfterminen nach Abschnitt 3.3.5.3 wurden die Prismen augenscheinlich auf etwaige Anzeichen einer Schädigung untersucht. Es wurde unterschieden zwischen feinen Rissen (Rissweite  $w < 0,1\text{ mm}$ ) und groben Rissen sowie zwischen einzelnen, diskreten und massiven, großflächigen Ausscheidungen.

### 3.3.5.5 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Nach Beendigung der Mörtelprismenversuche waren folgende Fragen von Interesse:

- Wie haben sich das Aussehen (ursprünglich wie Glasbruchstücke) und die Zusammensetzung des Wasserglases verändert?
- Ist Wasserglas in den Feinmörtel des Betons eingedrungen; wenn ja, wie weit unter welchen Bedingungen?
- Ist das Calciumhydroxid eine Verbindung mit dem Wasserglas eingegangen? Wenn ja, welche Morphologie oder Kristalle haben sich gebildet?

Zur Beantwortung wurden die Prismen in der Ebene der Bohrlöcher sowie im Abstand von 2 cm davon gespalten, so dass eine Probe von etwa 4 x 4 x 2 cm<sup>3</sup> vorlag, an der im Rasterelektronenmikroskop das Bohrloch und das angrenzende Gefüge betrachtet werden konnte. Die Untersuchungen wurden mit einem ESEM Philips XL 30 FEG durchgeführt, das mit einem semiquantitativen, energiedispersiven Röntgenspektrometer ausgestattet ist. Damit war es möglich, die z.T. sehr wasserreichen Proben in ihrem Originalzustand morphologisch zu beurteilen und gleichzeitig die Zusammensetzung der Phasen zu bestimmen. Darüber hinaus konnten wegen der guten optischen Auflösung auch kleine Fließwege und Ablagerungen der Wassergläser im Zementstein identifiziert werden. Die Untersuchungen wurden im Niedervakuum (ESEM-Modus) durchgeführt.

## **4 Darstellung der Ergebnisse**

### **4.1 Allgemeine Betoneigenschaften**

#### *4.1.1 Frischbeton*

Die Frischbetoneigenschaften sind im Anhang der Tafel A-2 zu entnehmen. Die Frischbetonrohddichte der Betone B1 bis B7 variierte auf Grund der stark unterschiedlichen Betonzusammensetzung in einem Bereich von 2350 bis 2460 kg/m<sup>3</sup>. Die übrigen von der Zusammensetzung ähnlichen Betone B8 bis B14 wiesen eine Rohddichte von 2260 bis 2280 kg/m<sup>3</sup> auf. Die Streubreite beim Luftgehalt war zwischen den Betonen B1 bis B7 und B8 bis B14 vergleichbar, jedoch enthielten erstgenannte Betone mit 0,9 bis 2,6 % gegenüber 0,3 bis 1,5 % deutlich mehr Luft. Das ist auf eine im Vergleich steifere Konsistenz und damit schlechtere Verarbeitbarkeit dieser Betone zurückzuführen. Während die Betone B1 bis B7 den Konsistenzbeschreibungen weich bis sehr steif gemäß DIN 1045-2:2001-07 zuzuordnen waren und damit einen entsprechend den unterschiedlichen Betonzusammensetzungen weiten Konsistenzbereich abdeckten, waren die Betone B8 bis B14 bis auf eine Ausnahme (B12) fließfähig bis sehr fließfähig.

### 4.1.2 Festbeton

Die ermittelten Festbetonkenngrößen im Alter von 28 d sind ebenfalls in Tafel A-2 enthalten. Die Festbetonrohddichte war auf Grund der Trockenlagerung meist geringfügig kleiner als die Frischbetonrohddichte. Die Druckfestigkeit der Betone lag zwischen 28 und 62 Mpa und stellte sich entsprechend der gewählten Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung ein.

## 4.2 Induktionsphase – Auswirkung der Feuchtebelastung

### 4.2.1 Voruntersuchungen

Die zur Befeuchtung der Nebelkammern erforderlichen Defensoren wurden mit Wasser aus dem Düsseldorfer Leitungsnetz betrieben. Gemäß chemischer Analysen der Stadtwerke Düsseldorf aus dem Untersuchungszeitraum enthielt das Leitungswasser im FIZ bei Einspeisung in das Leitungsnetz rd. 35 mg/l Na<sup>+</sup> und 4 mg/l K<sup>+</sup>-Ionen. Um zu überprüfen, inwiefern diese Alkalianteile auch bei Entnahme aus dem Netz enthalten sind und auf die Analysen Einfluss nehmen können, wurde der erzeugte Nebel über unterschiedliche Zeiträume aufgefangen. Anschließend wurden jeweils Teilproben entnommen und, wie in Abschnitt 3.2.4.6 beschrieben, die Alkalikonzentrationen bestimmt. Die Ergebnisse sind im linken Balkendiagramm in Bild 4-1 der Analyse der Stadtwerke gegenübergestellt.

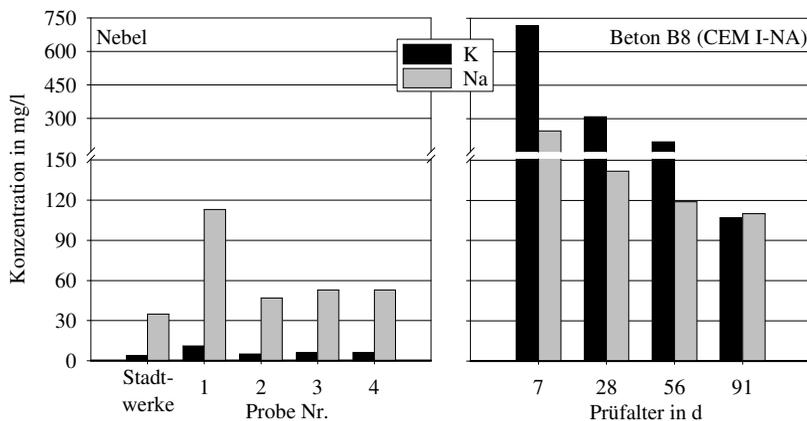


Bild 4-1: Alkaligehalt des aufgefangenen Nebels (links) und des von den Probekörpern des Betons B8 abgelaufenen Wassers (rechts) bei Lagerung NK40

Sowohl die  $\text{Na}^+$  als auch die  $\text{K}^+$ -Konzentration war nach Entnahme größer und sie variierte zum Teil sehr deutlich. Eine unspezifische Alkaliquelle oder eine temporäre Verdunstung könnten hierfür verantwortlich sein, ließen sich jedoch nicht abschließend bestätigen. Letztendlich ließ sich kein fester Basiswert der  $\text{Na}^+$  bzw.  $\text{K}^+$ -Konzentration festlegen, der von den Analyseergebnissen bei den Nebelkammerlagerungen hätte abgezogen werden müssen, um die tatsächlich aus der Betonprobe ausgelaugte Alkalimenge zu ermitteln.

Um den daraus resultierenden Fehler abschätzen zu können, wurden im rechten Teil von Bild 4-1 vergleichend zu den Alkaligehalten im Nebel die Analyseergebnisse des Betons B8 aufgetragen. Für diesen war auf Grund des eingesetzten NA-Zements die kleinste Menge ausgelaugter Alkalien zu erwarten. Im ungünstigsten Fall (Prüfalter 91d) war der vermeintlich ausgelaugte Na-Anteil in etwa gleich dem maximal im aufgefangenen Nebel festgestellten Anteil. Eine grobe Fehleinschätzung der ausgelaugten Na-Menge konnte daher nicht ausgeschlossen werden. Bei K entsprach die Menge im Nebel maximal etwa 10 % der Menge aus dem Beton B8 zum Prüfalter 91d. Der mittlere Fehler der Analysen Nr. 1 bis 4 für dieses Prüfalter lag bei rd. 5 %.

Da der Zement CEM I (1,3) als Basiszement der weiteren Betone etwa gleich viel Na enthielt wie der Zement CEM I-NA (Tafel A-1), war eine signifikante Verkleinerung des Fehlers für die Na-Analysen nicht zu erwarten. Die gemessenen Na-Anteile im Auslaugwasser wurden daher nicht weiter ausgewertet. Demgegenüber konnte für K auf Grund des etwa dreifachen Gehalts im Zement CEM I (1,3) davon ausgegangen werden, dass der tatsächliche Fehler bei den übrigen Betonen nochmals deutlich kleiner als für Beton B8 ist. Er lag damit im Bereich der Genauigkeit der chemischen Analyseverfahren. Eine ausreichende Vergleichbarkeit der ausgelaugten Kaliummengen bei Lagerung in der Nebelkammer mit weiteren Lagerungen konnte daher ohne eine Korrektur angenommen werden.

## 4.2.2 *Zur Auswertung berechnete Größen*

### 4.2.2.1 *Wasseraufnahme*

Zur Auswertung der Auslaugversuche werden insgesamt 4 Größen herangezogen. Die Wasseraufnahme WA gemäß Gl. 3-2 dient zur Kontrolle, inwiefern und wie schnell sich die Gleichgewichtsfeuchte im Beton einstellt. Zusätzlich kann über diese Größe bei Lagerung NK40 eine etwaige Störung des Nebelkammerbetriebs festgestellt werden. Schließlich wird sie zur Hilfestellung bei der Interpretation der nachfolgend dargestellten Verdünnung der Porenlösung herangezogen.

#### 4.2.2.2 Verdünnung der Porenlösung $V_{PL}$

Bei einer Wasseraufnahme/-abgabe erhöht bzw. verringert sich der Anteil des freien Wassers im Beton. Die Alkalikonzentration der Porenlösung nimmt entsprechend ab oder zu. Um diesen Einfluss auf eine AKR zu quantifizieren, wird zunächst der spezifische freie Wassergehalt im Betonprobekörper ( $w_{f,spez}$ ) definiert, in dem die Alkalien gelöst vorliegen. Mit der Annahme, dass ggf. im Zement enthaltene weitere Hauptbestandteile kein Wasser binden, berechnet er sich nach Gl. 4-1 wie folgt.

$$w_{f,spez} = \left( w/1000 - w_{ch} \cdot z_{CEMI} / 100 \right) \cdot \frac{H_{nom} \cdot B_{nom} \cdot L_{nom}}{1000} \text{ [g]} \quad \text{Gl. 4-1}$$

mit  $w$                    Zugabewassermenge in kg  
 $w_{ch}$                    gemäß dem Ansatz in [Cat 77] aus der Phasenberechnung nach Bogue berechnete maximal chemisch gebundene Wassermenge des CEM I-Zements in g/100g  
 $z_{CEMI}$                 Anteil an CEM I-Zement in 1 l Beton in g  
 $(H, B, L)_{nom}$         nominale Abmessungen des Probekörpers in cm

Bezieht man den spezifischen freien Wassergehalt auf die Summe aus diesem und der Wasseraufnahme  $\Delta m_{WA}$  gemäß Gl. 3-1, erhält man die Verdünnung der Porenlösung  $V_{PL}$  in % der Porenlösungskonzentration, die ohne Veränderung des freien Wasseranteils vorliegen würde (Gl. 4-2). Dabei wird vorausgesetzt, dass das Wasser im Beton stets gleichmäßig verteilt ist.

$$V_{PL} = \frac{w_{f,spez}}{\Delta m_{WA} + w_{f,spez}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Bei der Betrachtung wird vernachlässigt, dass der Zementklinker im jungen Beton noch nicht vollständig hydratisiert ist. Somit ist der tatsächliche spezifische freie Wassergehalt im Beton größer als gemäß Gl. 4-1 berechnet wird. Der dadurch bedingte Fehler in der Berechnung von  $V_{PL}$  gemäß Gl. 4-2 ist jedoch vertretbar, da der spezifische freie Wassergehalt sowohl im Nenner als auch im Zähler einfach in die Berechnung von  $V_{PL}$  eingeht. Darüber hinaus war die Wasseraufnahme gegenüber dem spezifischen freien Wassergehalt bei den gewählten w/z-Werten relativ klein.

#### 4.2.2.3 Ausgelaugte Kaliummenge $K_{kum}$

Es war zu erwarten, dass die ausgelaugte K-Menge mit größerem Leimanteil im Beton, höherem K-Gehalt des Zements, geringerer Dichtigkeit des Betongefüges, größerer Probenoberfläche, höherer Temperatur und Feuchte der Umge-

bung zunimmt. Zur Plausibilitätskontrolle dieser Zusammenhänge werden die ausgelaugten Kaliummengen je Zeitintervall aufsummiert.

$$K_{\text{kum}} = \sum_i m_{\text{k},i} \quad [\text{mg}] \quad \text{Gl. 4-3}$$

mit  $m_{\text{k},i}$  gemäß Gl. 3-3 berechnete Kaliummenge in mg für die Zeiträume  $i$  von 1 bis 7, 7 bis 28, 28 bis 56 und 56 bis 91d

Die zeitlichen Verläufe der kumulierten K-Mengen sind im Anhang A den Tafeln A-3 bis A-18 zu entnehmen. Sie werden zur Hilfestellung bei der Interpretation des wirksamen Kaliumanteils im Beton herangezogen.

#### 4.2.2.4 *Potentiell wirksamer Kaliumanteil $K_{\text{pot}}$*

Grundsätzlich ist die in der Porenlösung enthaltene K-Menge als wirksam zu betrachten und etwaige ausgelaugte Mengen müssten auf diese bezogen werden, um die Reduzierung des AKR-Potentials zu bewerten. Der K-Gehalt der Porenlösung lässt sich jedoch bei Beton mit geringem Zementgehalt bzw. w/z-Wert nicht langfristig erfassen. Um dennoch die Auswirkung einer Auslaugung bewerten zu können, muss daher eine andere Bezugsgröße gefunden werden.

In konserviertem Zementstein liegen nicht alle Alkalien aus dem Portlandzement in der Porenlösung vor. Andererseits können vormalig in Hydratphasen des CEM I-Zements oder in Reaktionsprodukten weiterer Hauptbestandteile gebundene Alkalien durch Auslaugung, d.h. Reduzierung der Alkalikonzentration in der Porenlösung, wieder freigesetzt werden [Sch 04]. Der insgesamt wirksame Alkaligehalt wird dadurch über die Menge hinaus erhöht, die ein Portlandzement in einem abgeschlossenen System freisetzt. Deswegen erscheint es angemessen, vereinfachend die durch den Portlandzement in den Beton eingetragene K-Menge als maximal wirksamen, in der Porenlösung befindlichen K-Gehalt  $K_{\text{eff}}$  zu definieren.

Das Verhältnis zwischen ausgelaugter K-Menge  $K_{\text{kum}}$  und dem maximal wirksamen K-Gehalt  $K_{\text{eff}}$  drückt den Anteil der ausgelaugten K-Ionen aus. Die Differenz aus diesem Verhältnis und dem maximal wirksamen Anteil (100%) entspricht dann dem potentiell verbleibenden K-Anteil ( $K_{\text{pot}}$ ) in der Porenlösung eines Probekörpers (Gl. 4-4).

$$K_{\text{pot}} = \left( 1 - \frac{K_{\text{kum}}}{K_{\text{eff}}} \right) \cdot 100$$

$$= \left( 1 - \frac{K_{\text{kum}}}{\frac{z_{\text{CEMI}} \cdot K_2O_{\text{CEMI}}}{100} \cdot \frac{H_{\text{nom}} \cdot B_{\text{nom}} \cdot L_{\text{nom}}}{1000} \cdot \frac{2 \cdot u_K}{u_{K_2O}} \cdot 1 \cdot 10^6} \right) \cdot 100 \quad [\%] \text{ Gl. 4-4}$$

mit  $K_{\text{kum}}$  ausgelagte Kaliummenge gemäß Gl. 4-3 in mg  
 $K_{\text{eff}}$  durch CEM I eingetragene, maximal wirksame Kaliummenge im Betonprobekörper in mg  
 $z_{\text{CEMI}}$  Anteil an CEM I-Zement im 10-cm-Würfel in g  
 $K_2O_{\text{CEMI}}$  Kaliumoxidgehalt des verwendeten CEM I in M.-%  
 $(H, B, L)_{\text{nom}}$  nominale Abmessungen des Probekörpers in cm  
 $u_{K/K_2O}$  Molmasse von K bzw.  $K_2O$  in g/mol

#### 4.2.3 Verdünnung der Porenlösung durch Wasseraufnahme

##### 4.2.3.1 Einfluss der Lagerung

In Bild 4-2 ist die Auswirkung der Lagerung auf die Verdünnung der Porenlösung für einem Beton gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 [Deu 07] gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lagerung in einer Nebelkammer unmittelbar nach dem Ausschalen der Prismen (NK40 und SAL) zur einer deutlichen Reduzierung der Porenlösungskonzentration bis zum Betonalter von 7d geführt hat ( $V_{\text{PL}} = 88 \%$ ). Sie ist auf eine entsprechend starke Wasseraufnahme der Probekörper zurückzuführen (Bild B-1). Demgegenüber lag bei Lagerung Ü60 die Verdünnung etwas über 100 % (minimalen Aufkonzentration der Porenlösung durch eine geringfügige Wasserabgabe (Bild B-1)). Während bei den Lagerungen NK40 und Ü60 im weiteren Verlauf keine wesentlichen Änderungen mehr verzeichnet wurden, nahm die Konzentration bei Lagerung SAL nach Auslagerung aus der 20 °C-Nebelkammer langsam wieder zu. Durch eine entsprechende Wasserabgabe betrug die Verdünnung im Alter von 91d nur noch rd. 95 % der planmäßigen Konzentration.

Insgesamt liegen deutliche Unterschiede zwischen den Lagerungen vor. Bei Lagerung Ü60 werden die voreingestellten Bedingungen am besten eingehalten. Bei Lagerung SAL, und damit im Außenlager, können diese ggf. langfristig wieder erreicht werden. Zu Beginn allerdings wird die Porenlösung, wie bei Lagerung NK40 im gesamten Verlauf (durchschnittlich 85%), deutlich durch eine starke Wasseraufnahme während der Nebelkammerlagerung verdünnt.

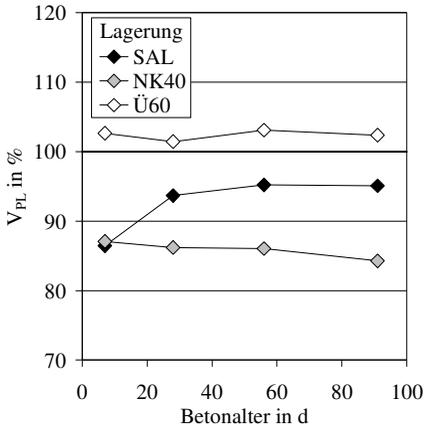


Bild 4-2: Zeitlicher Verlauf der Verdünnung der Porenlösung in Abhängigkeit von der Lagerung; Beton mit 400 kg/m<sup>3</sup> Zement CEM I (1,3), w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel (SAL, NK40) bzw. 7,5x7,5x28 cm<sup>3</sup> Prismen (Ü60) mit jeweils A/V = 0,6 cm<sup>-1</sup>

#### 4.2.3.2 Einfluss der Probekörpergröße

Entgegen den Versuchen bei Lagerung Ü60, entsprechend die Probekörper bei Lagerung SAL und NK40 nicht den Abmessungen der zugehörigen Prüfvorschrift (10x10x50 cm<sup>3</sup> Balken und 30-cm-Würfel). Um dennoch die Verhältnisse abschätzen zu können, die bei Prüfung gemäß Vorschrift vorliegen, musste die Abhängigkeit der Verdünnung  $V_{PL}$  und des verbleibenden Kaliumanteils  $K_{pot}$  (4.2.4.2) von der Probekörpergröße geklärt werden.

In Bild 4-3 ist die Verdünnung der Porenlösungskonzentration in Abhängigkeit der Probekörpergröße dargestellt. Sie bewegt sich darin für die verschieden großen Probekörper (Beton gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3) unabhängig von der Lagerung in einem engen Korridor von etwa 3 %. Darüber hinaus stellte sich keine Reihenfolge entsprechend der Probekörpergrößen ein. Das gilt ebenso für die Wasseraufnahme (Bild B-2). Daher ist davon auszugehen, dass die Wasseraufnahme und die dadurch bedingte Verdünnung der Porenlösung im Probekörper während der Prüfung weitgehend unabhängig von dessen Abmessungen ist und im Wesentlichen nur durch die Lagerung bestimmt wird. Die am 10-cm Würfel gewonnenen Ergebnisse sind daher auf übliche Probekörper übertragbar.

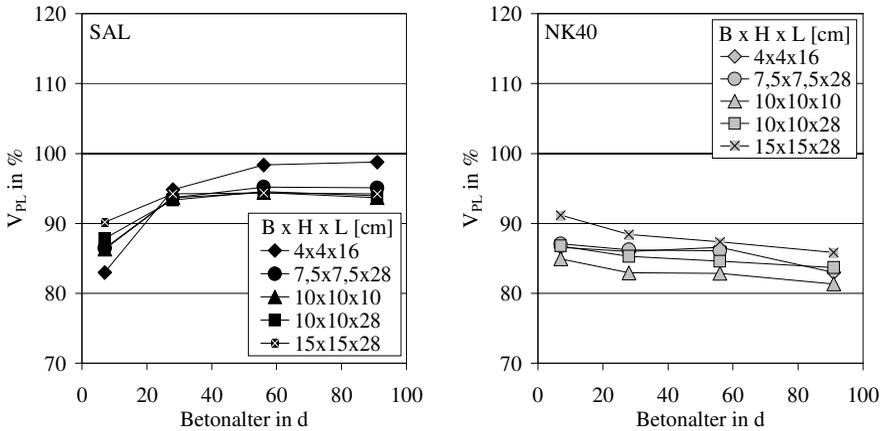


Bild 4-3:: Zeitlicher Verlauf der Verdünnung der Porenlösung in Abhängigkeit von der Probekörpergröße; Beton mit Zement CEM I (1,3),  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,45$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16, Lagerung SAL (links) und Lagerung NK40 (rechts)

#### 4.2.3.3 Einfluss der Zementart

Im Vergleich zum Klinker wird die Reaktion und Gefügeentwicklung von Hütensand, Flugasche und Silikastaub stärker durch die Umgebungstemperatur beeinflusst. Das kann sich auf den Wasserhaushalt und damit auf die Verdünnung der Porenlösung auswirken. Deshalb wurde in die Untersuchungen zum Einfluss der Zementart die Lagerung Ü60 mit einbezogen. Die Ergebnisse sind in Bild 4-4 zusammengestellt.

Eine eindeutige Tendenz in Abhängigkeit der Zementart ist nicht ersichtlich. Bei Lagerung SAL konzentrierte sich die Porenlösung nach anfänglicher von der Zementart unabhängigen Wasseraufnahme bis zum Alter von 7d ( $V_{PL} = 90 \%$ ) langfristig in der Reihenfolge CEM II/A-D < CEM II/A-S = CEM I < CEM II/A-V wieder auf (> 28d). Im Alter von 91d wurde mit Ausnahme des Betons mit CEM II/A-D bei allen Betonen die Ausgangskonzentration wieder erreicht. Bei Lagerung NK40 wurde die Porenlösung unabhängig vom Zement schnell auf etwa 90 % verdünnt und blieb dann konstant. Während der Lagerung Ü60 wurde nur die Porenlösung des Betons mit CEM II/A-D durch Wasseraufnahme (Bild B-3) auf 95 % der planmäßigen Konzentration verdünnt. Das Bestreben Wasser aufzunehmen und zu halten (vgl. Lagerung SAL) scheint daher bei Verwendung von Zement mit Silikastaub grundsätzlich ausgeprägter zu sein. Das deckt sich in gewisser Weise mit Ergebnissen in [Fel 06]. Dort wurde ein

schlechter Frostwiderstand hochfesten Betons mit Silikastaub während der Laborprüfung auf einen höheren Anteil gefrierbaren Wassers zurückgeführt, der in den Reaktionsprodukten des Silikastaubs gehalten wird.

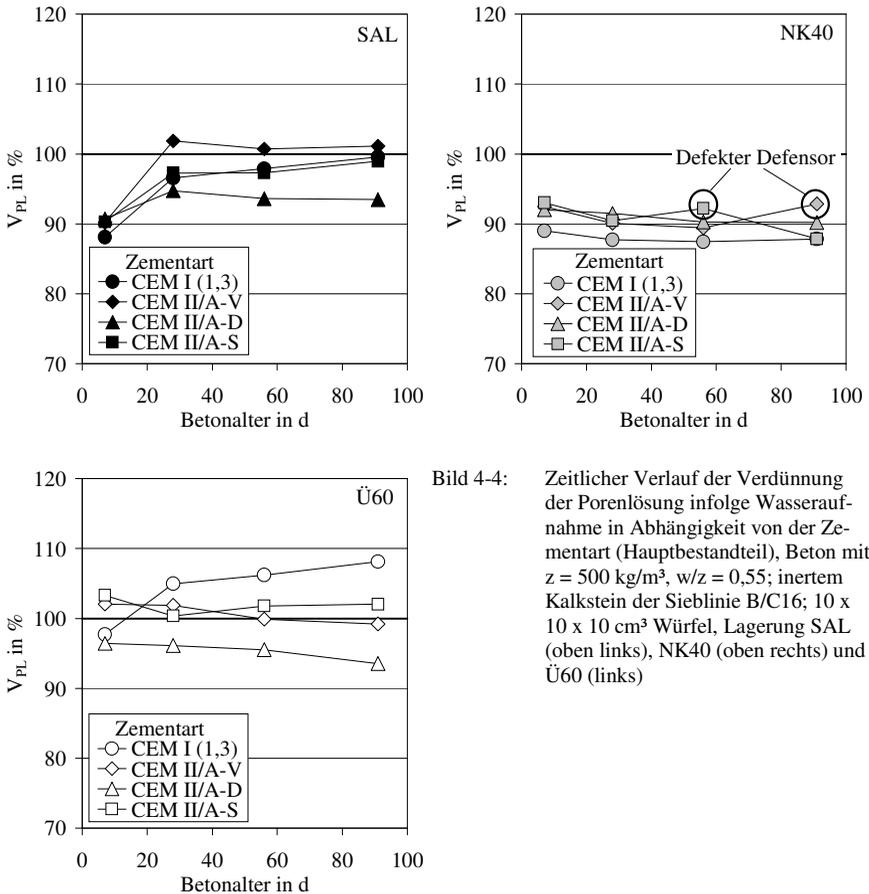


Bild 4-4: Zeitlicher Verlauf der Verdünnung der Porenlösung infolge Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zementart (Hauptbestandteil), Beton mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C16;  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Würfel, Lagerung SAL (oben links), NK40 (oben rechts) und Ü60 (links)

#### 4.2.3.4 Einfluss des $w/z$ -Werts

Auf Grund des hinlänglich bekannten Zusammenhangs zwischen  $w/z$ -Wert und Gefügedichte des Betons wurde erwartet, dass bei kleinem  $w/z$ -Wert der Beton während der Prüfung weniger Wasser aufnimmt und die Konzentration der Porenlösung nur wenig von der planmäßigen Konzentration (= 100%) abweicht.

Wie aus dem linken Teil von Bild 4-5 hervorgeht, wurde diese Erwartung nicht erfüllt. Die Konzentration der Porenlösung im Beton war umso geringer, je kleiner der w/z-Wert war. Bereits im Betonalter von 7d stellte sich beim w/z-Wert von 0,35 eine Verdünnung auf 80 % der angestrebten Konzentration ein. Der Unterschied zu den übrigen Betonen betrug zu diesem Zeitpunkt unabhängig von der Lagerung etwa 10 %. Im Vergleich zum Beton mit w/z = 0,45 blieb der Abstand bestehen, im Vergleich zu dem mit w/z = 0,55 nahm er bis zum Alter von 91d auf 13 % (SAL) und 15 % (NK40) weiter zu. Es muss somit bei den untersuchten Lagerungen vor allem bei Beton mit kleinem w/z-Wert angenommen werden, dass bei feuchten Umgebungsbedingungen in jungem Betonalter die Porenlösung durch Wasseraufnahme deutlich verdünnt wird. Eine schädigende AKR ist dadurch weniger wahrscheinlich.

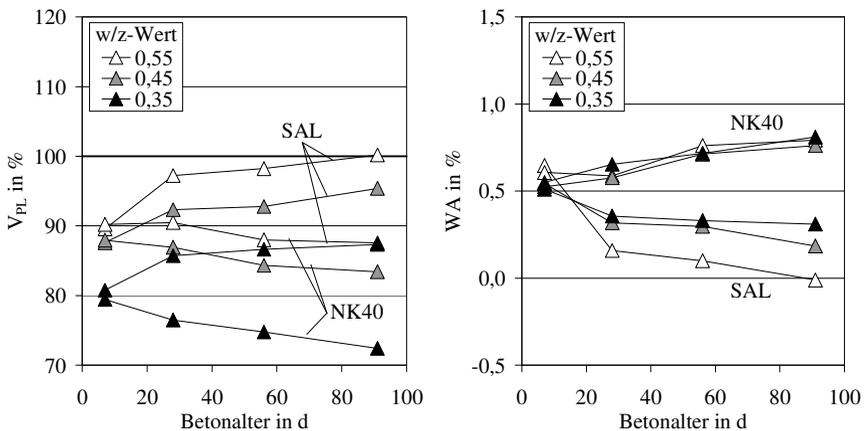


Bild 4-5: Zeitlicher Verlauf der Verdünnung der Porenlösung (links) und der Wasseraufnahme (rechts) in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Lagerung; Beton mit Zement CEM I (1,3),  $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16;  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Würfel

Eine Erklärung für diese Beobachtung liefert der rechte Teil von Bild 4-5. Die Betone haben danach bei Feuchtlagerung unabhängig vom w/z-Wert in etwa gleich viel Wasser aufgenommen. Infolge unterschiedlicher freier spezifischer Wassergehalte ( $w_{f, \text{spez}}$ ) führt dies zu den großen Unterschieden bei der Verdünnung  $V_{PL}$  (vgl. Gl. 4-2). Die Ursache ist wahrscheinlich der durch die Hydratation bedingte Sogeffekt in den Gelporen des Zementsteins [Loc 00], der mit abnehmendem w/z-Wert größer wird. Er bewirkt eine vermehrte Aufnahme von Wasser, die eine behinderte Wasseraufnahme durch ein dichteres Gefüge ausgleicht. Bei Untersuchungen zur Dichtigkeit von Beton werden die Probekörper zunächst an Luft vorgelagert. Der Sog bewirkt dabei einen Lufteintrag. Bei der nachfolgenden Prüfung ist dann nur noch das dichtere Gefüge wirksam, das geringere Wassereindringtiefen gewährleistet.

#### 4.2.3.5 *Einfluss weiterer betontechnologischer Parameter*

Neben den bereits dargestellten Einflussgrößen wurde auch der Einfluss des Zementgehalts, des Alkaligehalts im Zement und der Sieblinie der Gesteinskörnung auf die Wasseraufnahme und eine dadurch bedingte Verdünnung der Porenlösung untersucht. In keiner der Versuchsreihen deutete sich eine Abhängigkeit von diesen Größen an. Jedoch wurden bei den Untersuchungen die Unterschiede zwischen den beiden Lagerungen SAL und NK40, wie in Abschnitt 4.2.3.1 dargestellt, bestätigt. Differenzen  $\Delta V_{PL}$  von 10 bis 15 % in der Konzentration der Porenlösung traten dabei zwischen den Lagerungen auf.

#### 4.2.4 *Reduzierung des wirksamen Kaliumanteils durch Auslaugung*

##### 4.2.4.1 *Einfluss der Lagerung am 10-cm Würfel*

In Bild B-4 und Bild 4-6 sind die ausgelaugte K-Menge und der potentiell wirksame K-Anteil für einen Beton gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 dargestellt. Im Vergleich der Lagerungen existieren demnach deutliche Unterschiede, so dass im Hinblick auf eine schädigende AKR kaum von übertragbaren Verhältnissen ausgegangen werden kann.

Im Detail stellte sich zunächst heraus, dass nach 7d bei Lagerung SAL und NK40 dem 10-cm-Würfel bereits 6 % bzw. 10 % des maximal wirksamen K-Anteils durch eine Auslaugung entzogen wurden. Demgegenüber fiel der Verlust bei Lagerung Ü60 bis zum Alter von 7d mit 2 % gering aus. Das Verhalten lässt sich wie folgt erklären: Bei gleichen Feuchtebedingungen (Nebelkammer bei Lagerung SAL und NK40) verhält sich die Auslaugung proportional zur Temperatur [Hoh 03], so dass bei Lagerung NK40 ein größerer Verlust als bei Lagerung SAL auftritt. Ferner ist die anfängliche Auslaugung bei direkter Beaufschlagung der Probekörper mit flüssigem Wasser größer – eine Diffusion von innen nach außen kann unmittelbar einsetzen – als bei Lagerung über Wasser (Lagerung Ü60). Hier erwärmt sich die Luft im Container zunächst schneller als das Wasserbad. Die relative Luftfeuchte fällt ab und führt zu einer erhöhten Verdunstung über dem Wasserbad und dem feuchten Probekörper. Dieser trocknet dadurch oberflächlich aus und etwaige Diffusionsvorgänge sind unterbrochen, bis die Kapillarporen über eine sich später wieder einstellende hohe Gleichgewichtsfeuchte der Luft (Wasserbad) wieder gefüllt werden und erst dann eine kontinuierliche Auslaugung ermöglichen.

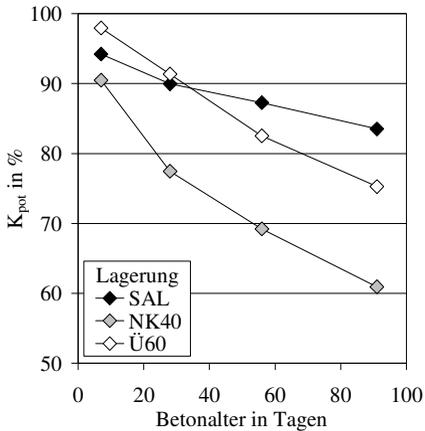


Bild 4-6: Zeitlicher Verlauf des potentiell wirksamen Kaliumanteils im Beton in Abhängigkeit von der Lagerung; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel (SAL, NK40) bzw. 7,5x7,5x28 cm<sup>3</sup> Prismen (Ü60) mit jeweils A/V = 0,6 cm<sup>-1</sup>

Letztgenannte wird für Lagerung Ü60 in Bild 4-6 ab einem Alter von 28d deutlich. Der potentiell im Probekörper verbleibende K-Anteil fiel ab diesem Zeitpunkt ebenso schnell ab wie bei Lagerung NK40. Letztendlich betrug er bei Lagerung NK40 und Ü60 nur noch 61 % bzw. 76 % nach 91d. Demgegenüber verlangsamte sich die Auslaugung bei Lagerung SAL auf Grund der auf die Nebelkammerlagerung folgenden Wechsellagerung mit zeitweisen Trockenperioden deutlich. Nach 91d betrug der potentiell im Beton verbleibende K-Anteil noch 83 %. Die ausgelaugte Menge war damit weniger als halb so groß wie bei Lagerung NK40.

#### 4.2.4.2 Einfluss der Probekörpergröße

In Abhängigkeit der Probekörpergröße wurden sowohl für die ausgelaugte K-Menge als auch für den potentiell wirksamen K-Anteil klare Unterschiede bei Lagerung NK40 festgestellt (Bild 4-7). Für beide Größen stellte sich eine eindeutige Reihenfolge bzgl. der Probekörpergröße ein. Die absolut ausgelaugte K-Menge nahm erwartungsgemäß vom kleinsten zum größten Prisma hin zu. Der im Probekörper verbleibende potentiell wirksame K-Anteil war dagegen umso kleiner, je kleiner das Prisma war. Ursache dafür ist, dass die absolut ausgelaugte K-Menge ( $K_{\text{kum}}$ ) bezogen auf die maximal wirksame K-Menge ( $K_{\text{eff}}$ ), die direkt vom Volumen des Probekörpers abhängt (Gl. 4-4), bei den schlanken Prismen größer ist als bei den kompakteren. Die Beobachtungen gelten für Lagerung SAL gleichermaßen (Bild B-5).

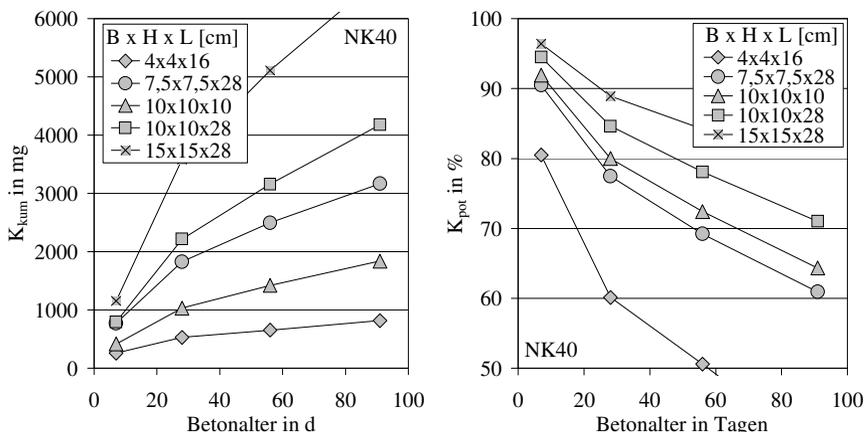


Bild 4-7: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge (links) und des potentiell im Probekörper wirksamen Kaliumanteils (rechts) in Abhängigkeit von der Probekörpergröße; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3); w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B 16, Lagerung NK40

Um die Abhängigkeit des potentiell wirksamen K-Anteils von der Probekörpergröße näher zu beschreiben, wurden in Bild 4-8 für Lagerung SAL und Lagerung NK40 die zu den Prüfzeitpunkten im Probekörper potentiell wirksamen K-Anteile über deren Verhältnis A/V aufgetragen. Es zeichnete sich für jedes Prüfalter ein linearer Zusammenhang ab. Mit entsprechender Vorgabe wurden die dargestellten Regressionsgeraden berechnet.

Das Steigungsmaß der Geradengleichungen nahm mit zunehmendem Prüfalter zu. Das ist auf die größer werdenden Unterschiede zwischen den verschiedenen Probekörpern zurückzuführen. Darüber hinaus ist auffällig, dass gemäß der Geradengleichung in jungem Betonalter mehr als 100 % potentiell wirksamen Ks vorgelegen haben. Praktisch ist dies nicht möglich. Die abnehmende Tendenz deutet darauf hin, dass ggf. eine unverhältnismäßige anfängliche Auswaschung an Alkalien von der Oberfläche [Hoh 03] dafür verantwortlich ist. Umgekehrt zeigen Werte kleiner 100 % bei Lagerung NK40 an, dass vor allem bei den kleinen Prismen im Prüfalter > 28d ggf. eine Verarmung an K eintritt.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Probekörperabmessungen einen signifikanten Einfluss auf die potentiell wirksame Menge K im Probekörper haben. Für einen bestimmten Zeitpunkt der Prüfung ist von einem linearen Zusammenhang zwischen potentiell wirksamen K-Anteil im Probekörper und dem A/V-Verhältnis des Probekörpers auszugehen. Die in Bild 4-8 dargestellten Gleichungen können für einen Beton gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 und die Lagerungen NK40 und SAL angesetzt werden.

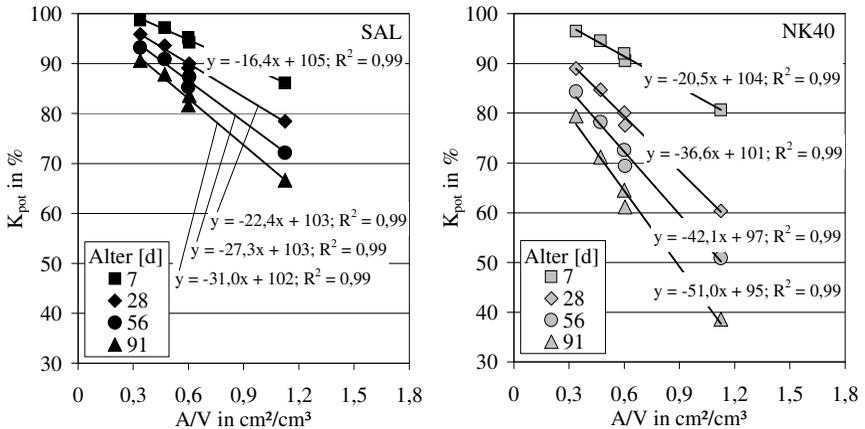


Bild 4-8: Im Probekörper potentiell wirksamer Kaliumgehalt in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis der Probekörper und dem Probenalter; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16, Lagerung SAL (links) und Lagerung NK40 (rechts)

#### 4.2.4.3 Einfluss des Zementgehalts

Es war zu erwarten, dass mit steigendem Zement- und damit Leimanteil im Beton die ausgelaugte Menge K ansteigt. Dieser Zusammenhang wird im linken Teil von Bild 4-9 bestätigt. Jedoch zeigt der rechte Teil des gleichen Bildes, dass in beiden untersuchten Lagerungen der potentiell wirksame K-Anteil nicht in dem Beton am stärksten abfiel, der den höchsten Zementgehalt aufwies.

Zur Erklärung dieses scheinbaren Widerspruchs ist zu berücksichtigen, dass der potentiell wirksame K-Anteil ausschließlich vom Verhältnis der ausgelaugten K-Menge ( $K_{\text{kum}}$ ) zum maximalen wirksamen K-Anteil ( $K_{\text{eff}}$ ) im Probekörper abhängt (vgl. Gl. 4-4). Letzterer verändert sich im gleichen Verhältnis wie der Zementgehalt. Die ausgelaugte K-Menge dagegen ist in erster Linie abhängig von der K-Konzentration der Porenlösung. Diese ist unabhängig vom Zementgehalt, so dass auf Grund eines gleich großen Konzentrationsgefälles zwischen

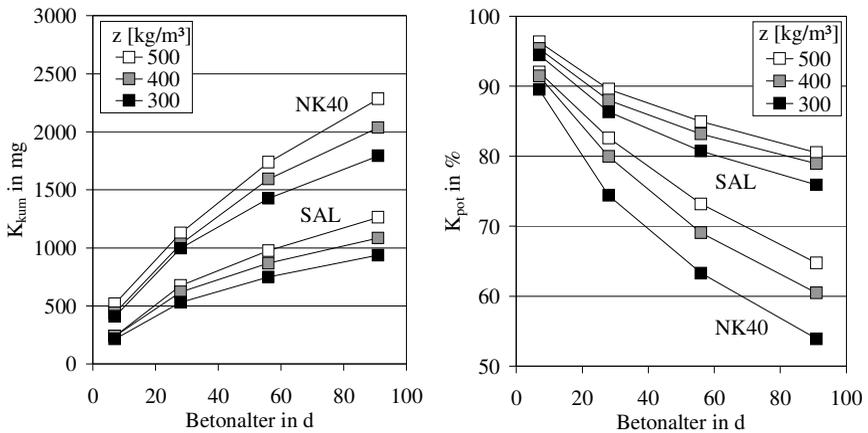


Bild 4-9: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge  $K_{\text{kum}}$  (links) und des potentiell wirksamen Kaliumanteils  $K_{\text{pot}}$  (rechts) in Abhängigkeit vom Zementgehalt; Beton mit Zement CEM I (1,3),  $w/z = 0,45$  und inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm Würfel gelagert in Lagerung SAL und NK40

Porenlösung und oberflächlich anfallendem Wasser vergleichbare Mengen K ausgelaugt werden (vgl. Bild 4-9,  $\leq 28\text{d}$ ). Bezogen auf den bei kleinerem Zementgehalt kleineren maximal wirksamen K-Anteil führt dies zu einem größeren Verlust beim potentiell wirksamen K-Anteil. Die im weiteren Verlauf eingetretene Auffächerung der ausgelaugten Menge hat, da die relativen Differenzen klein zur Relation der Zementgehalte sind, keine Bedeutung. Sie ist ggf. auf eine bereits vorliegende Verarmung an Kalium in den Probekörpern mit kleinen Zementgehalten zurückzuführen.

#### 4.2.4.4 Einfluss des Alkaligehalts im Zement

Der maximal wirksame K-Anteil  $K_{\text{eff}}$  im Beton ist direkt vom K-Gehalt des Zements abhängig. Wäre darüber hinaus auch die ausgelaugte Menge K ( $K_{\text{kum}}$ ) direkt vom Alkaligehalt des Zements abhängig, müsste sich auf Grund des Bezugs beider Größen aufeinander zur Berechnung des potentiell wirksamen K-Gehalts  $K_{\text{pot}}$  ein vom K-Gehalt des Zements unabhängiger Verlauf ergeben. Dieser Fall trat bei den Untersuchungen nicht ein (Bild 4-10). Im Beton mit dem NA-Zement war nach 91d nur noch ein Anteil von 45 % des maximal wirksamen Ks im Beton enthalten. Der Beton mit alkalireichem Zement enthielt dagegen noch 59 %.

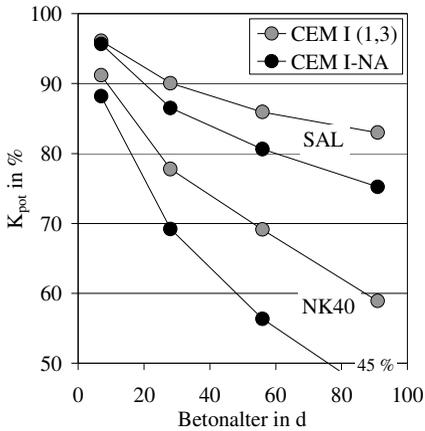


Bild 4-10: Zeitlicher Verlauf des potentiell wirksamen Kaliumanteils in Abhängigkeit vom Alkaligehalt des CEM I-Zements, Beton mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C16;  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Würfel

Tafel A-1 ist zu entnehmen, dass das K-verhältnis zwischen den beiden eingesetzten Zementen 1:3 betrug. Das Verhältnis der ausgelaugten Kaliummengen zwischen den Betonen betrug dagegen nur 1:2,2 (SAL) bzw. 1:2,4 (NK40) (Bild D-6). Folglich wurde aus den Betonprobekörpern mit alkalireichem Zement, bezogen auf die Ausgangsmenge, vergleichsweise weniger K ausgelaugt. Das ist auf einen bei Verwendung von alkalireichem CEM I Zement größeren in den Hydratphasen gebundenen Alkalianteil zurückzuführen [Sch 04]. Im Vergleich zur maximal wirksamen K-Menge steht damit in solch einem Beton weniger K in der Porenlösung für eine Auslaugung zur Verfügung als in einem mit alkalireichem CEM I-Zement.

#### 4.2.4.5 Einfluss der Zementart

Auf Grund der Darstellungen in Abschnitt 2.3, in dem das Verhalten weiterer Hauptbestandteile im Zement (Alkalibindung, Gefügeverdichtung) beschrieben ist, war zu erwarten, dass der maximal wirksame K-Anteil infolge einer Auslaugung bei Verwendung von Zementen mit diesen weiteren Hauptbestandteilen weniger reduziert wird. Fraglich blieb dagegen, in welchem Umfang dies der Fall ist. Bild 4-11 und Bild B-7 fassen die Ergebnisse zusammen.

Für Lagerung SAL stellte sich heraus, dass sowohl die ausgelaugte K-Menge als auch der potentiell wirksame K-Anteil für alle verwendeten Zemente in vergleichbarer Größenordnung liegt. Bei Lagerung NK40 wurden die Verläufe durch einen temporären Ausfall der Defensoren etwas verfälscht. Vor allem bei dem Beton mit CEM II/A-S war von einer insgesamt höheren Menge ausgelaugten Ks und einem entsprechend kleineren potentiell wirksamen K-Anteil auszugehen. In Abhängigkeit der Zementart wurde der potentiell wirksame K-Anteil

im Beton in der Reihenfolge CEM II/A-D < CEM II/A-V < CEM II/A-S < CEM I verringert. Die Reihenfolge entspricht dem Potential, die Alkalität der Porenlösung zu reduzieren [Sch 04].

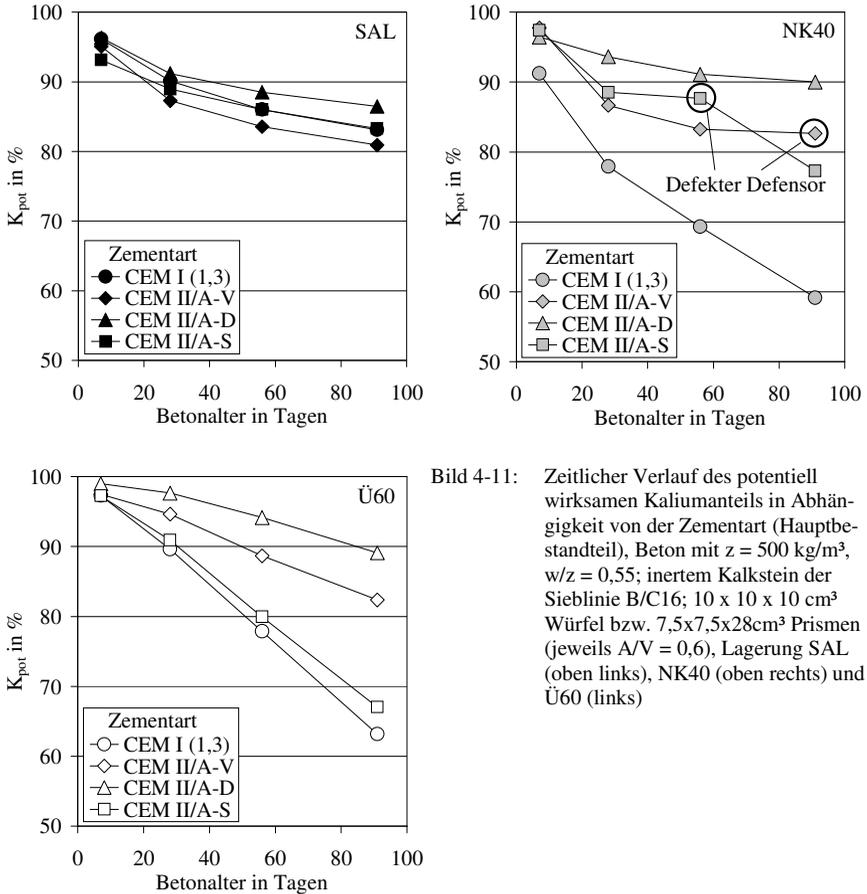


Bild 4-11: Zeitlicher Verlauf des potentiell wirksamen Kaliumanteils in Abhängigkeit von der Zementart (Hauptbestandteil), Beton mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C16;  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Würfel bzw.  $7,5 \times 7,5 \times 28 \text{ cm}^3$  Prismen (jeweils  $A/V = 0,6$ ), Lagerung SAL (oben links), NK40 (oben rechts) und Ü60 (links)

Gegenüber der Lagerung SAL ist auffällig, dass der potentiell wirksame K-Anteil bei Verwendung der Zemente mit Puzzolanen bei Lagerung NK40 trotz wesentlich höherer Feuchtebelastung in der gleichen Größenordnung lag. Bei Verwendung von CEM I und CEM II/A-S Zement dagegen wurde erwartungsgemäß der potentiell wirksame K-Anteil stärker reduziert als bei Lagerung SAL. Das Gleiche gilt mit Ausnahme der bereits diskutierten geringeren Auslaugung zu Beginn prinzipiell auch für Lagerung Ü60. Allerdings näherte sich der Beton mit CEM II/A-S dem mit CEM I-Zement an.

Zusammenfassend bedeuten die Ergebnisse, dass bei Verwendung von Zement mit Puzzolanen als Hauptbestandteil eine Auslaugung und damit einhergehende Verminderung des potentiell wirksamen K-Anteils eher gering ist. Bei Verwendung von CEM I und CEM II/A-S dagegen kann eine verstärkte Auslaugung bei Lagerung in feuchter Umgebung auftreten und ein diskrepantes Verhalten verursachen. Dabei wirken sich bei Zement CEM II/A-S höhere Temperaturen förderlich im Sinne einer größeren Auslaugung aus.

#### 4.2.4.6 Einfluss des w/z-Werts

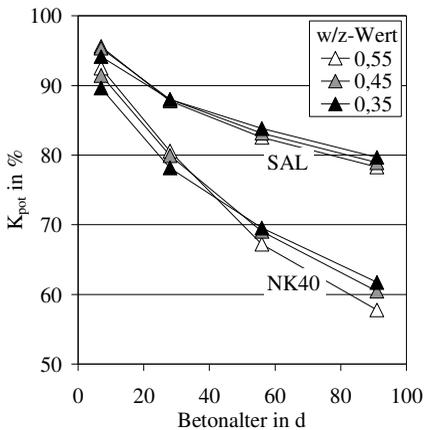


Bild 4-12: Zeitlicher Verlauf des potentiell wirksamen Kaliumanteils in Abhängigkeit vom w/z-Wert; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I, inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel, Lagerung SAL und NK40

Anhand von Bild 4-12 ist zu erkennen, dass die potentiell wirksame K-Menge weitgehend unabhängig vom w/z-Wert war. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass ein bei kleinerem w/z-Wert geringerer Diffusionskoeffizient [Hoh 03] die Wirkung einer höheren K-Konzentration der Porenlösung [Nix 87] ausgleicht. Das führt zu etwa gleichen Auslaugmengen (Bild B-8).

#### 4.2.4.7 Einfluss der Sieblinie

In Beton mit gleichem Leimanteil jedoch unterschiedlichem Kornband der Gesteinskörnung liegt bei feiner zusammengesetztem Kornband prinzipiell ein größeres Volumen an porösen Kontaktzonen vor. Inwiefern sich dies auf eine Auslaugung bzw. den potentiell wirksamen K-Anteil auswirkt, zeigen Bild 4-13 und Bild B-9. Bei Lagerung der Probekörper in der Nebelkammer (NK40 andauernd, SAL bis 7d) wurde infolge einer Auslaugung der verbleibende Kaliumanteil im Beton mit der feineren Sieblinie B/C 16 stärker abgemindert als bei Sieblinie A/B 16. Im weiteren Verlauf der Lagerung SAL näherten sich die

Betone dagegen wieder einander an. Entsprechend scheint sich das größere Volumen an Kontaktzonen bei Sieblinie B/C16 nur bei Lagerung unter sehr feuchten Bedingungen negativ auszuwirken.

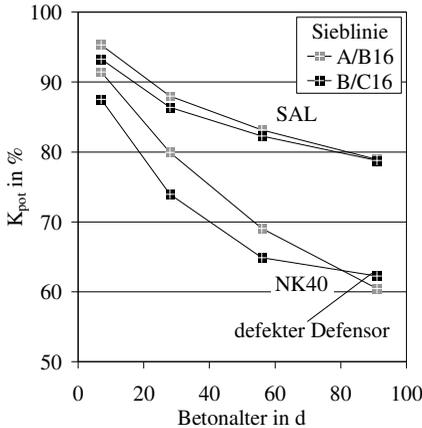


Bild 4-13: Zeitlicher Verlauf des potentiell wirksamen Kaliumanteils in Abhängigkeit von der Sieblinie der Gesteinskörnung, Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I, w/z = 0,45; inertem Kalkstein; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel, Lagerung SAL und NK40

## 4.2.5 Verifizierung der Ergebnisse anhand von Porenlösungsanalysen

### 4.2.5.1 Qualitative Verifizierung

Stellt man die K<sup>+</sup>-Konzentrationen der Porenlösung aus einem einer Befeuchtung ausgesetzten und einem konserviert gelagerten Betonprobekörper einander gegenüber, lässt sich der Einfluss der Feuchtlagerung auf die K<sup>+</sup>-Konzentrationen der Porenlösung in einem Probekörper direkt beurteilen. In Bild 4-14 ist eine derartige Auswertung für Betone der Lagerungen SAL, NK40 und Ü60 zusammengestellt, aus denen ausreichend und langfristig Porenlösung gewonnen werden konnte (zugehörige Rohdaten können den Tafeln A-20 und A-22 bis A-24 entnommen werden). Der Abstand zwischen den einzelnen Verläufen ist dabei ein Maß für den gemeinsamen Einfluss von Auslaugung und Wasseraufnahme. Dieser variierte in Abhängigkeit der Zementart und Lagerung mehr oder weniger deutlich.

Mit Ausnahme des Betons mit Zement CEM II/A-D war bei Lagerung SAL und NK40 bereits nach 7d die K<sup>+</sup>-Konzentration im nicht konserviert gelagerten Probekörper deutlich reduziert. Das korreliert mit den sehr feuchten Bedingungen (Nebelkammer) und entsprechender Verdünnung der Porenlösung infolge Wasseraufnahme. Im weiteren Verlauf wurde die Differenz bei Verwendung

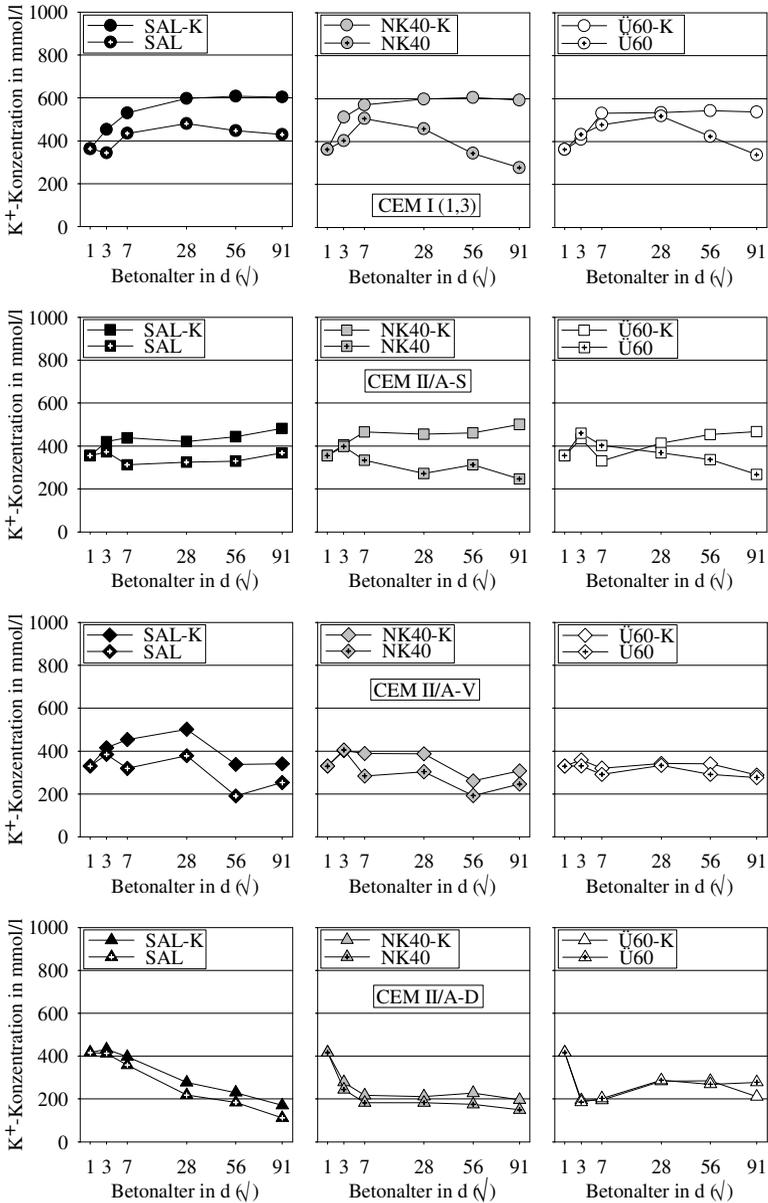


Bild 4-14: Zeitlicher Verlauf der K<sup>+</sup>-Konzentration in der Porenlösung von konserviert (-K) und nicht konserviert gelagerten Betonproben mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$  und inertem Kalkstein der Sieblinie B/C16

von CEM I immer größer, bei SAL in geringen, bei NK40 in größeren Raten. Hier wirkte sich die im Vergleich zu Lagerung SAL mehr als doppelt so hohe Auslaugung bei Lagerung NK40 aus. Wurde ein CEM II/A-S eingesetzt, zeigte sich ein vergleichbares, in seiner Ausprägung jedoch weniger deutliches Verhalten, so dass sich bei Lagerung SAL eher ein paralleler Verlauf der  $K^+$ -Konzentration zwischen konserviertem und nicht konserviertem Beton im Alter  $> 7d$  einstellte. Für Beton mit den Zementen CEM II/A-V bzw. CEM II/A-D galt das Gleiche grundsätzlich auch bei Lagerung NK40 und Ü60. Die Beobachtung ist konform mit einem in diesen Fällen im Zeitraum  $> 7d$  jeweils nur noch minimal abfallenden verbleibenden K-Anteil im Beton. Bei Lagerung Ü60 wirkten sich die anfangs geringere Auslaugung und minimale Wasseraufnahme so aus, dass im nicht konserviert gelagerten Beton die  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung mit der des konservierten Betons bis zum Alter von 28d nahezu identisch war. Die Wahrscheinlichkeit einer AKR wurde in diesem Zeitraum im Gegensatz zu den anderen Lagerungen nicht abgemindert. Im weiteren Verlauf wurde die  $K^+$ -Konzentration infolge einer zunehmenden Auslaugung und Wasseraufnahme nur geringer, wenn die Zemente CEM I und CEM II/A-S verwendet wurden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die anhand der Verdünnung  $V_{PL}$  und des verbleibenden Kaliumanteils  $K_{pot}$  dargestellten Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Porenlösung (Alkalikonzentration) qualitativ sehr gut anhand der im Beton vorliegenden  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung nachvollziehen lassen.

#### 4.2.5.2 *Quantitative Verifizierung*

Da, wie eingangs des letzten Abschnitts erwähnt, die  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung sowohl die Auswirkungen einer Wasseraufnahme als auch einer Auslaugung beinhaltet und diese nicht getrennt betrachtet werden können, war es für eine quantitative Verifizierung erforderlich, die Größen  $V_{PL}$  und  $K_{pot}$  zusammenzufassen. Beide Zahlen drücken aus, auf welchen prozentualen Anteil der Ausgangskonzentration sich die Porenlösung infolge Wasseraufnahme bzw. Auslaugung verdünnt. Auslaugung und Wasseraufnahme sind voneinander unabhängige Prozesse, d.h., die Absenkung der Porenlösungskonzentration infolge Auslaugung muss auf die bereits infolge Wasseraufnahme verdünnte Porenlösungskonzentration angewendet werden. Mathematisch heißt das, dass die Größen  $V_{PL}$  und  $K_{pot}$  miteinander multipliziert werden müssen, um die Gesamtreduzierung der Porenlösungskonzentration zu berechnen. Diese kann der prozentualen Reduzierung gegenübergestellt werden, die sich aus dem Verhältnis der  $K^+$ -Konzentration zwischen nicht konserviert und konserviert gelagertem Probekörper ergibt.

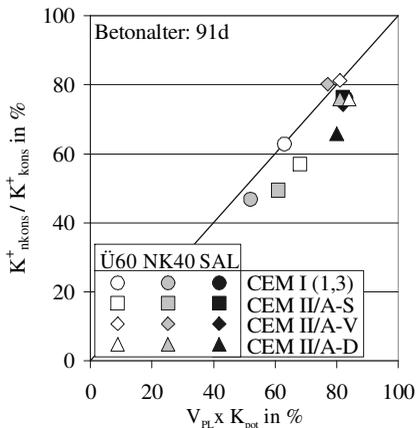


Bild 4-15: Vergleich der tatsächlichen prozentualen Reduzierung der  $K^+$ -Konzentration in der Porenlösung mit der aus Verdünnung  $V_{PL}$  und potentiell wirksamen Kaliumanteil  $K_{pot}$  berechneten Reduzierung

In Bild 4-15 ist diese Gegenüberstellung für ein Betonalter von 91d gezeigt. Daraus geht hervor, dass die gleiche Größenordnung mit beiden Vorgehensweisen erreicht wurde, jedoch die tatsächlich eingetretene Reduzierung der Porenlösungskonzentration tendenziell größer war als durch Wasseraufnahme und Auslaugung über die berechneten Größen  $V_{PL}$  und  $K_{pot}$  abzusehen. Diese Tendenz war bei Betonen mit Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen stärker ausgeprägt als bei dem Beton mit Zement CEM I (1,3). Folglich kann für Betone mit CEM I-Zement angenommen werden, dass die bei der Definition von  $V_{PL}$  und  $K_{pot}$  getroffenen Annahmen die Ergebnisse nicht negativ beeinflussen und damit berechnete Verhältnisse in der Porenlösung von Betonprobekörpern der Größe und Tendenz nach den realen Verhältnissen entsprechen.

#### 4.2.6 Verhältnisse bei Prüfung gemäß Prüfvorschrift

In den Lagerungen NK40 und SAL wurden die Untersuchungen nicht an Probekörpern gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 durchgeführt, so dass für diese noch kein abschließendes Bild der Realität vorliegt. Für die Wasseraufnahme und damit verbundene Verdünnung  $V_{PL}$  wurde in Abschnitt 4.2.3.2 deutlich, dass keine Abhängigkeit von der Probekörpergröße vorliegt. Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.3.1 zur Verdünnung der Porenlösung infolge Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Lagerung konnten daher direkt für eine Abschätzung der realen Verhältnisse übernommen werden.

Der umgekehrte Fall lag hinsichtlich der Auslaugung bzw. des verbleibenden Kaliumanteils im Probekörper vor. Die an den 10-cm-Würfeln gewonnen Ergebnisse zum potentiell verbleibenden Kaliumanteil  $K_{pot}$  mussten deshalb für die Lagerungen SAL und NK40 auf die realen Probekörper (Balken mit den Abmessungen  $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ , 30-cm Würfel) umgerechnet werden. Die in Ab-

schnitt 4.2.4.2 hergeleiteten Übertragungsgleichungen konnten dafür genutzt werden, da der den Untersuchungen zum Lagerungseinfluss auf die Auslaugung zu Grunde liegende Beton demjenigen entsprach, der zur Ableitung des Probekörpereinflusses verwendet wurde. Die Berechnung ist Tabelle A-19 zu entnehmen. Die Ergebnisse sind in Bild 4-16 im Vergleich zum potentiell wirksamen K-Anteil für Lagerung Ü60 gegenübergestellt, der auf Grund der von vornherein „richtigen“ Probekörper mit den Abmessungen 7,5x7,5x28 cm<sup>3</sup> ohne Umrechnung direkt übernommen werden konnte.

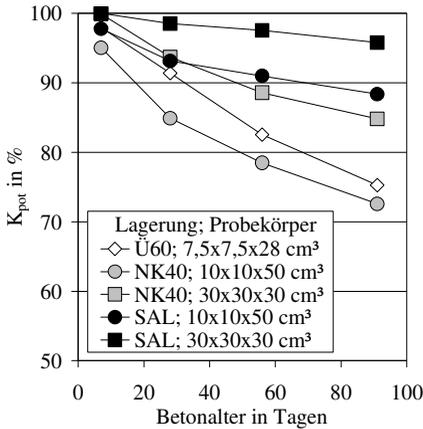


Bild 4-16: Potentiell wirksame Kaliummengen für einen Beton gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 gelagert im Außenlager (SAL), in der 40 °C-Nebelkammer (NK40) gemäß Alkali-Richtlinie und bei 60 °C über Wasser gemäß NF-P 18454, Probekörperabmessung gemäß den genannten Vorschriften

Die Verhältnisse haben sich infolge des Einflusses der Probekörpergröße gegenüber der Darstellung in Bild 4-6 verschoben. Auf Grund der größeren A/V-Verhältnisse ist der potentiell wirksame K-Anteil in der Porenlösung in den realen Probekörpern (10 x 10 x 50 cm<sup>3</sup> Balken, 30-cm-Würfel) deutlich größer als in den 10-cm-Würfeln. Im Vergleich zum Prisma gelagert bei 60 °C, für das die Ergebnisse direkt übernommen werden können, hat er wieder zugenommen.

Die zuvor durchgeführte Umrechnung auf die realen Probekörpergrößen ermöglicht, dass der potentiell wirksame Kaliumanteil  $K_{pot}$  wie in Abschnitt 4.2.5.2 mit der probekörperunabhängigen Verdünnung  $V_{PL}$  multipliziert werden kann. Als Ergebnis erhält man dadurch die auf die realen Probekörper bezogene prozentuale Auswirkung von Auslaugung und Wasseraufnahme auf die  $K^+$ -Konzentration in der Porenlösung eines Betons gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 ( $w/z = 0,45$ ;  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ , CEM I mit 1,3 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}}$ ), der in verschiedenen Lagerungen geprüft wurde.

Anhand von Bild 4-17 wird deutlich, dass die konstante und direkte Zufuhr von Wasser (Nebel) bei Lagerung NK40 zur im Vergleich größten Abminderung der  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung führt. Bereits im Alter von 28d wird sie auf 74 % des ursprünglichen Wertes reduziert. Selbst im Würfel mit 30 cm Kanten-

länge wird die  $K^+$ -Konzentration auf etwa 85 % nach 28 d verringert. Nach 91d sind noch Werte von 64 % für den Balken und 75 % für den Würfel zu erwarten.

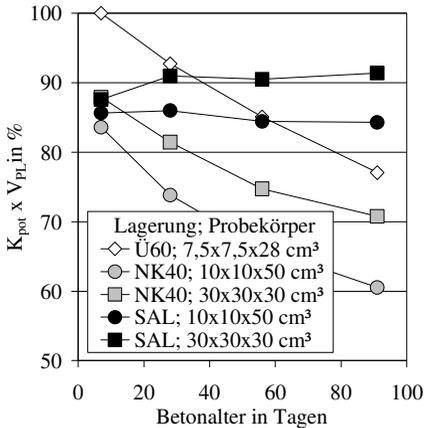


Bild 4-17: Reduzierung der  $K^+$ -Konzentration infolge Wasseraufnahme ( $V_{pt}$ ) und Auslaugung ( $K_{pot}$ ) in Abhängigkeit von Lagerung und Probekörper. Beton zusammengesetzt gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3

Bei Lagerung Ü60 wird fast kein Wasser durch die Prismen mit den Abmessungen  $7,5 \times 7,5 \times 28 \text{ cm}^3$  aufgenommen (Abschnitt 4.2.4.1). Deshalb ist  $K_{pot}$  (Auslaugung) nahezu identisch mit der Gesamtreduzierung der  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung. Nach 28d beträgt sie noch 93 % und ist vergleichbar mit der im 30-cm-Würfel bei Lagerung SAL zu diesem Zeitpunkt. Im weiteren Verlauf verringert sie sich bis auf etwa 73 % der planmäßigen Konzentration.

Während der Lagerung SAL steigt die  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung im Würfel nach anfänglicher deutlicher Abminderung infolge Wasseraufnahme und Auslaugung in der  $20^\circ\text{C}$ -Nebelkammer wieder an (Austrocknung), um nach 28d ein konstantes Niveau von etwa 91 % zu erreichen. Im Balken ( $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ ) ist nach einer anfänglichen starken Verdünnung bis auf etwa 86 % nach 7d ein konstanter Verlauf zu erwarten. Austrocknung und Auslaugung scheinen sich ab diesem Zeitpunkt auszugleichen. Insgesamt führen die nur temporär feuchten Umgebungsbedingungen bei Lagerung SAL zur im Vergleich geringsten Abminderung der  $K^+$ -Konzentration. Lagerung SAL spiegelt somit langfristiger am ehesten die Verhältnisse in einem realen Bauteil wider.

#### 4.2.7 Zusammenfassung

Mit den zuvor dargestellten Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass sich Wasseraufnahme/-abgabe und Auslaugung bei den Lagerungen gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 (NK40) und NF P 18454 (Ü60) sowie bei einer an die Außenlagerung des FIZ angelehnten Lagerung (SAL) deutlich auf die  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung im Beton auswirken und damit auf das Auftreten

einer AKR Einfluss nehmen können. Basierend auf den Ergebnissen, die anhand eines Betons mit Zusammensetzung gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 gewonnen wurden, ließen sich unter Berücksichtigung der realen Probekörpergrößen während der Prüfungen folgende Schlussfolgerungen ziehen.

#### Lagerung SAL

Die Wahrscheinlichkeit einer AKR ist im Vergleich zu baupraktischen Verhältnissen nur geringfügig kleiner. Die Ursache dafür ist eine relativ unmittelbar einsetzende, zeitlich auf 7d beschränkte Reduzierung der  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung in den Probekörpern, die hauptsächlich auf eine Wasseraufnahme zurückzuführen ist. Die Balken laugen zusätzlich noch ein wenig aus. Im Vergleich zu baupraktischen Verhältnissen ist demnach selbst für die als Referenzlagerung geltende Außenlagerung eine Fehleinschätzung bezüglich einer AKR nicht gänzlich auszuschließen.

#### Lagerung NK40

Gegenüber den realen Verhältnissen wird hier infolge einer permanenten Beaufschlagung der Probekörper mit Wasser (Nebel) die Wahrscheinlichkeit für eine AKR kontinuierlich kleiner. Während bis zum Alter von 7d die Wasseraufnahme maßgeblich ist, wird die Abminderung der  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung in den Probekörpern im Weiteren durch eine kontinuierliche Auslaugung bestimmt. Diesbezüglich ist insbesondere der Balken gefährdet. Insgesamt erscheint eine Fehleinschätzung einer potentiellen AKR ohne Gegenmaßnahmen zu ergreifen relativ wahrscheinlich.

#### Lagerung Ü60

Anfänglich relativ trockene Bedingungen im Edelstahlcontainer führen dazu, dass die Voraussetzungen für eine AKR bis 28d gegenüber dem Ausgangszustand kaum verändert sind. Infolge einer ausgeprägten Auslaugung und damit verbundenen Absenkung der  $K^+$ -Konzentration in der Porenlösung werden sie jedoch im Weiteren zunehmend ungünstiger. Eine Fehleinschätzung einer AKR ist hier bezogen auf die Auswirkung der Feuchtlagerung vor allem dann denkbar, wenn sie erst spät auftritt.

Die zuvor dargestellten Auswirkungen wurden anhand einer standardisierten Betonzusammensetzung abgeleitet, wie sie in der Regel bei der Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen eingesetzt wird. Bei einer etwaigen Performance-Prüfung gilt es unterschiedlich zusammengesetzte Betone auf das Auftreten einer AKR hin zu untersuchen. Folgende Beobachtungen sind dabei im Vergleich zu einem Beton gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 bei einer Feuchtlagerung zu berücksichtigen.

- In Beton mit geringerem w/z-Wert wird die  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung wegen einer erhöhten Wasseraufnahme verstärkt abgesenkt.
- In Beton mit geringerem Zementgehalt oder mit Zement, der deutlich niedrigere Alkaligehalte aufweist, wird die  $K^+$ -Konzentration infolge Auslaugung relativ zum Ausgangswert schneller reduziert.
- Die Gefahr, eine AKR im Hinblick auf das Auftreten unter praktischen Bedingungen zu unterschätzen, nimmt in diesen Fällen auf Grund der geringeren  $K^+$ -Konzentration zu; im umgekehrten Fall nimmt sie entsprechend ab.
- Die Verwendung von Zementen mit weiteren Hauptbestandteilen führt gegenüber einem Beton mit Zement CEM I zu einem deutlich abweichenden Verhalten. Es ist abhängig von der Art des weiteren Hauptbestandteils im Zement.
  - Die Beeinflussung der  $K^+$ -Konzentration durch eine Wasseraufnahme ist bei Beton mit CEM II/A-S und CEM II/A-V Zement in etwa wie bei einem Beton mit CEM I Zement einzuschätzen. Beton mit CEM II/A-D Zement nimmt tendenziell mehr Wasser auf. Ggf. wird dadurch eine AKR unterschätzt (geringere  $K^+$ -Konzentration in der Porenlösung).
  - Bezüglich einer Auslaugung ist zu beachten, dass sie bei Zement CEM II/A-S mit ansteigender Lagerungstemperatur zunimmt. Bei 60 °C ist die Gefahr eine AKR zu unterschätzen ebenso groß wie in einem Beton mit CEM I. Bei Verwendung von Zement mit Puzolanen ist die ausgelaugte K-Menge nahezu unabhängig von der Lagerung. Die Gefahr einer Fehleinschätzung infolge Auslaugung von Alkalien ist entsprechend gering.

Ob und inwiefern eine gegenüber den baupraktischen Verhältnissen reduzierte  $K^+$ -Konzentration der Porenlösung im Probekörper sich tatsächlich auf das Auftreten einer schädigenden AKR in der Laborprüfung auswirkt, hängt vor allem von der Kinetik der AKR unter den Prüfbedingungen ab. Läuft sie schnell ab, ist eine später einsetzende Auslaugung ggf. von untergeordnetem Einfluss. Hierzu können die Ergebnisse aus dem folgenden Abschnitt weitere Aufschlüsse geben.

Eine Wasseraufnahme bewirkt unabhängig davon, wie viel K oder Na die Porenlösung des Betons enthält, eine Verdünnung. Ferner ist [Hoh 03] zu entnehmen, dass sich K und Na hinsichtlich einer Auslaugung gleichwertig verhalten. Zusammengenommen kann somit angenommen werden, dass die hier für K dargestellten Zusammenhänge in gleicher Weise für Na gelten.

## 4.3 Induktionsphase – Auswirkung der Temperatur

### 4.3.1 Verschiebungen in der Abfolge der Einzelreaktionen

#### 4.3.1.1 Allgemeines

Bevor eine AKR ablaufen kann, muss die Konzentration an Alkalihydroxiden in der Porenlösung einen von der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung abhängigen Grenzwert überschritten haben. Der Zeitpunkt, an dem dieser Grenzwert überschritten wird, hängt bei einem Beton mit CEM I Zement vom Alkalisulfatisierungsgrad sowie von der Hydratationsgeschwindigkeit des Zements ab. Da die Hydratationsrate nach Arrhenius bei höheren Temperaturen größer wird, beeinflusst letztgenannte den Beginn einer AKR. Darüber hinaus beschleunigen höhere Temperaturen auch den weiteren Verlauf einer AKR, da die Löslichkeit der alkaliempfindlichen Kieselsäure mit der Temperatur ansteigt.

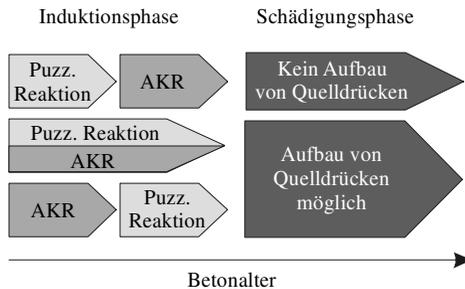


Bild 4-18: Notwendige Reaktionsabfolge zur Vermeidung einer AKR durch Alkalibindung

Beim Einsatz von CEM II-Zement mit Hüttsand oder puzzolanischen Bestandteilen zur Vermeidung einer schädigenden AKR wird das Ziel verfolgt, die Alkalihydroxidkonzentration in der Porenlösung möglichst klein zu halten. Ein bei gleichem w/z-Wert höherer freier Wassergehalt, eine geringe Alkalifreisetzung sowie eine Alkalibindung in den Reaktionsprodukten dieser Stoffe tragen dazu bei. Um eine AKR durch Alkalibindung zielsicher zu vermeiden, ist entscheidend, dass die Reaktion der Bestandteile in der Art vor Einsetzen einer AKR abläuft, dass die für die Gesteinskörnung kritische Alkalikonzentration nicht erreicht wird (Bild 4-18). Setzt die Reaktion mit oder nach Erreichen der kritischen Konzentration ein kann eine zielsichere Vermeidung einer AKR nicht gewährleistet werden, da keine Kontrolle darüber besteht, wie viel ASH entsteht und welche Eigenschaften es aufweist. Eine Überprüfung dieser Bedingung ist bisher weder für eine praxisnahe Lagerung noch für reaktionsbeschleunigende Prüfbedingungen erfolgt.

### 4.3.1.2 Feststellung des Reaktionsbeginns

#### 4.3.1.2.1 Alkali-Kieselsäure-Reaktion ( $t_{AKR}$ )

Bei Verwendung ausschließlich inerten Kalksteins im Beton sollte die Porenlösungszusammensetzung hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung mit der in reinem Zementstein vergleichbar sein, wenn Zement (hier CEM I (1, 3)) und w/z-Wert identisch sind. Wird in einem solchen Beton ein bestimmter Anteil des inerten Kalksteins gegen eine silikatische Gesteinskörnung ausgetauscht, verändert sich die Zusammensetzung der Porenlösung. Die Alkalihydroxide reagieren mit silikatischen Bestandteilen, so dass der Lösung Alkalien entzogen werden. Beschränkt sich die Reaktion auf freie Kieselsäureoberflächen (Silanolgruppen), ist anzunehmen, dass die Differenz zum Beton mit Kalkstein konstant bleibt und sich im Vergleich ein paralleler Verlauf einstellt. Nach Beobachtungen in [Bern 04] kann angenommen werden, dass nach einer Zeit von maximal 7d auch freie Oberflächen innerhalb eines Gesteinskorns reagiert haben. Tritt dagegen eine tiefgreifende Zerstörung der silikatischen Struktur durch Auflösung der Siloxanbindungen ein, sollte eine längerfristige Absenkung des Alkaligehalts in der Porenlösung eintreten. Bild 2-2 kann entnommen werden, dass selbst unter reaktionsbeschleunigenden Bedingungen mehr als 30d lang Alkalien aus der Porenlösung umgesetzt werden.

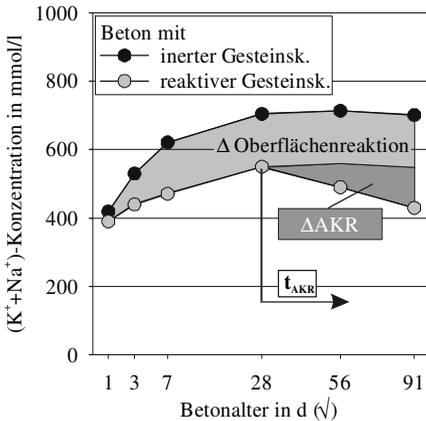


Bild 4-19: Beeinflussung der Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton mit CEM I durch eine silikatische, alkaliempfindliche Gesteinskörnung (schematisch)

Diese zeitliche Differenz zwischen Dauer einer Oberflächenreaktion und einer tiefgreifenden AKR kann zur Unterscheidung dieser Reaktionen genutzt werden. Sobald bei einem Vergleich ein Abfall der Alkalikonzentration auftritt, der länger als 7d andauert, kann von einer AKR im Sinne einer Gefügezerstörung, wie sie für eine schädigende AKR erforderlich ist, ausgegangen werden. Der Zeitpunkt, ab dem eine solch langfristige Absenkung einsetzt, wird für diese Arbeit als Beginn  $t_{AKR}$  einer AKR definiert (Bild 4-19).

Um den aus der zuvor geschilderten Auswertung folgenden Beginn einer AKR abzusichern, wird zusätzlich die Dehnung von parallel hergestellten Betonbalken ausgewertet. Wiederum wird der Beton mit Kalkstein dem mit alkaliempfindlicher, silikatischer Gesteinskörnung gegenübergestellt. Weicht die Dehnung des Betons mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung infolge der treibenden Reaktion nach oben ab, kann vom Eintritt einer schädigenden AKR ausgegangen werden. Da die Zerstörung der silikatischen Struktur, die eigentliche AKR, dem gefügeschädigenden Quellen des ASH vorgelagert ist, kann dadurch erstere zeitlich nach oben abgegrenzt werden. Weitere Indizien, die die gleiche Schlussfolgerung zulassen, sind augenscheinliche Veränderungen wie Risse oder gelartige Ausscheidungen am Probekörper.

#### 4.3.1.2.2 *Reaktion weiterer Hauptbestandteile ( $t_{HB}$ )*

Im Vergleich zu einem Beton ausschließlich mit Kalkstein als Gesteinskörnung und CEM I Zement verändert sich die Zusammensetzung der Porenlösung, wenn CEM II-Zemente verwendet werden. Die gleiche Klinkerbasis vorausgesetzt treten folgende Phänomene auf, die zu einer Reduzierung der Porenlösungskonzentration führen:

- Puzzolane und Hüttensand binden bei ihrer Reaktion kein bzw. nur sehr wenig Wasser. Entsprechend liegt bei gleichem w/z-Wert mehr ungebundenes und damit freies Wasser im Beton vor, in dem sich vor allem die Alkalien lösen können. Die Porenlösung wird verdünnt.
- Da die Alkalien in der Porenlösung hauptsächlich aus dem Zementklinker stammen und in CEM II Zement weniger Klinker enthalten ist als in CEM I Zement, verringert sich der effektive Alkalianteil.
- Letztlich werden Alkalien in die Reaktionsprodukte der weiteren Hauptbestandteile (Puzzolane) im Zement eingebunden (Abschnitt 2.3.2), wodurch der effektive Alkalianteil nochmals kleiner wird.

Das letztgenannte Phänomen setzt mit der Reaktion der Hauptbestandteile ein. Entsprechend lässt sich damit prinzipiell der Reaktionsbeginn  $t_{HB}$  der Hauptbestandteile feststellen, der durch eine abfallende Alkalikonzentration der Porenlösung gekennzeichnet ist. Wird der Konzentrationsabfall jedoch durch eine Alkalifreisetzung durch den Klinker überlagert, wird der Reaktionsbeginn nicht deutlich. Dieser Umstand wird umgangen, wenn die sich einstellende Alkalikonzentration im Beton mit CEM II/A Zement mit einer Referenz verglichen wird, die das Verhalten des Klinkers beinhaltet. Diese lässt sich aus dem Verlauf der Porenlösungskonzentration im CEM I-Beton über einen Verdünnungsfaktor  $V_{HB,PL}$  ableiten. Dazu wird die ursprüngliche Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton mit CEM I (1,3) um die bei der Verwendung von CEM

II/A Zement auftretenden, von der Reaktion der Hauptbestandteile unabhängigen Auswirkungen reduziert.

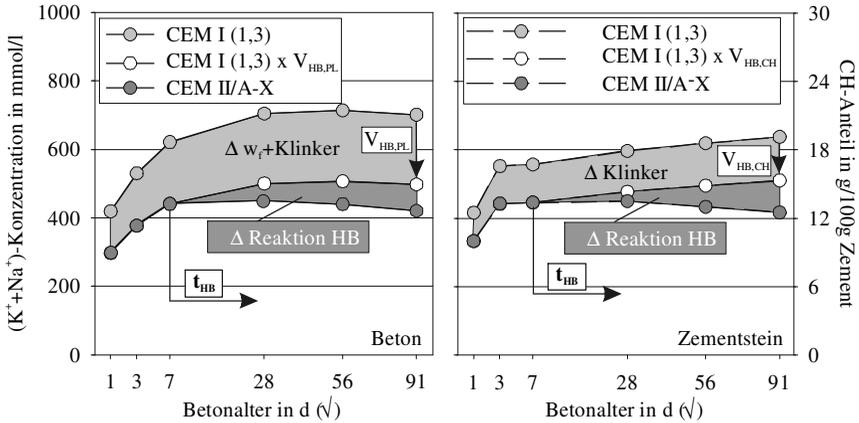


Bild 4-20: Auswertung der Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton (links) und des CH-Anteils im Zementstein (rechts) zur Feststellung des Eintretens der puzzolanischen bzw. latent-hydraulischen Reaktion

Die Verringerung des effektiven Alkalianteils durch einen geringeren Klinkeranteil entspricht dem Verhältnis des Klinkeranteils im CEM II-A Zement zu dem im Zement CEM I (1,3). In den Versuchen entspricht das einer Reduzierung der Konzentration auf 80 % (V, S) bzw. 90 % (D). Die Verdünnung der Porenlösung entspricht näherungsweise dem Verhältnis des gemäß Gl. 4-1 berechneten spezifischen freien Wassergehalts von Beton mit CEM I (1,3) und CEM II/A. Sie beträgt 88 % (V, S) bzw. 94 % (D). Zusammengenommen ergibt das einen Verdünnungsfaktor  $V_{HB,PL}$  von 71 % (V, S) bzw. 84 % (D). Er gibt, bezogen auf den Beton mit CEM I (1,3), die durch Verdünnung und geringeren Klinkeranteil verursachte prozentuale Abminderung der Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton mit CEM II/A Zement an. Die Zusammenhänge sind in Bild 4-20 links dargestellt.

Bei der Reaktion der weiteren Hauptbestandteile wird auch ein Teil des CHs im Zementstein des Betons verbraucht. Entsprechend deutet auch ein Abfall im CH-Anteil auf den Beginn der Reaktion der Hauptbestandteile hin (Bild 4-20 rechts). Deshalb werden zur Absicherung der Erkenntnisse aus den Porenlösungsanalysen auch die CH-Gehalte der parallel zu den Betonen hergestellten und gelagerten Zementsteine ausgewertet. Aus Gründen analog zur Auswertung der Alkalikonzentration der Porenlösung ist es hier ebenfalls zweckmäßig, einen Referenzverlauf zu haben, der die auf den Klinker bezogenen Auswirkungen bereits abbildet. Er lässt sich auf Basis des CH-Anteils im Zementstein mit CEM I (1,3) berechnen. Wenn CEM II/A Zement verwendet wird, reduziert sich

dieser in gleichem Maße wie der Klinkeranteil im Zement. Entsprechend beträgt der Umrechnungsfaktor  $V_{HB,CH}$  für die Berechnung des Referenzverlaufs 80 % (V, S) bzw. 90 % (D) (Bild 4-20 rechts).

#### 4.3.1.3 Referenzbeton und -zementstein

Im linken Teil des Bild 4-21 ist für die Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K die Alkalikonzentration der Porenlösung im Referenzbeton (B8) dargestellt. Bei Lagerung SAL-K stieg sie bis zum Alter von 28 d an und verharrte dann auf einem Niveau von etwa 700 mmol/l. Dieser Verlauf stimmte mit den Beobachtungen an Zementstein überein [Sch 04]. Während der Lagerung NK40-K wurde der Einfluss einer erhöhten Lagerungstemperatur durch eine höheren Alkalikonzentration der Porenlösung im Alter < 28d deutlich. Darüber hinaus wurde jedoch die gleiche Alkalikonzentration erreicht wie bei Lagerung SAL-K. Demgegenüber zeigte sich bei Lagerung Ü60-K, dass die Alkalikonzentration der Porenlösung nach anfänglich mit Lagerung SAL-K vergleichbarem Anstieg ab einem Alter von 7d auf einem niedrigeren Niveau von rd. 630 mmol/l verblieb.

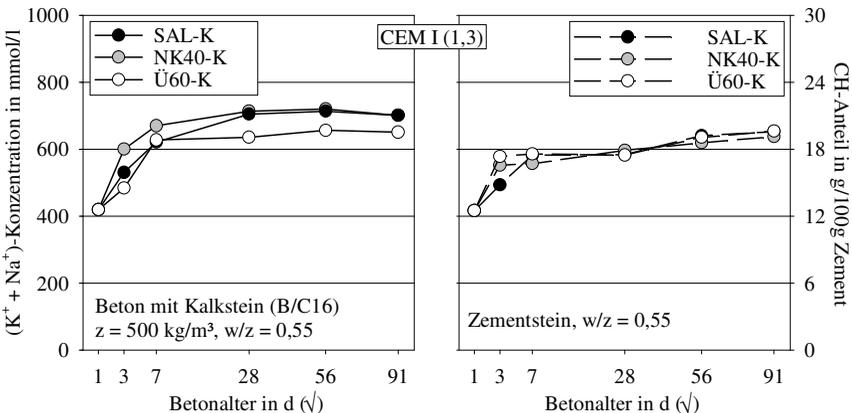


Bild 4-21: Zeitliche Entwicklung der Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton (links) und des CH-Anteils in Zementstein gleichen w/z-Werts (rechts) in Abhängigkeit des Temperaturregimes bei konservierter Lagerung

Zur Kontrolle, ob die niedrigere Alkalikonzentration der Porenlösung auf einen geringeren Anteil hydratisierten Klinkers oder auf Verschiebungen im Anteil gebundener Alkalien zurückzuführen ist, wurde der CH-Anteil des vergleichbar gelagerten Zementsteins als Indikator für den hydratisierten Klinkeranteil herangezogen (Bild 4-21 rechts). Die ab einem Alter von 28d gleich großen Mengen CH weisen darauf hin, dass während der Hydratation des Zements unabhängig von der Lagerungstemperatur etwa gleich viel Klinker umgesetzt wurde.

Entsprechend ist die geringere Alkalikonzentration der Porenlösung wahrscheinlich auf Verschiebungen im Gleichgewicht zwischen in der Porenlösung befindlichen und an Hydratphasen gebundenen Alkalien zurückzuführen. Darüber hinaus wurde anhand höherer CH-Gehalte im Alter < 28d bestätigt, dass die Hydratation bei höherer Lagerungstemperatur beschleunigt wird. Dabei war der Unterschied zwischen Lagerung SAL-K und NK40-K ausgeprägter als der zwischen NK40-K und Ü60-K.

#### 4.3.1.4 AKR mit silifiziertem Kalkstein und Hornstein (SKH)

Bild 4-22 zeigt die Auswertung zur Reaktionskinetik einer AKR mit silifiziertem Kalkstein und Hornstein (SKH). Die linke Bildreihe des Bildes verdeutlicht, dass die kritische Alkalikonzentration für die Gesteinskörnung SKH unabhängig vom Temperaturregime bei rd. 600 mmol/l lag. Ab dem Erreichen dieses Werts wurde die Alkalikonzentration auf Grund einer AKR zunehmend kleiner.

Der Verlauf der Alkalikonzentration weist darauf hin, dass bei den Lagerungen SAL-K und NK40-K anfänglich oberflächlich Alkalien gebunden wurden und deshalb die Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton mit Gesteinskörnung SKH bis zum Erreichen der kritischen Konzentration parallel zu der im Referenzbeton verlief. Bei Lagerung Ü60-K wurde diese Parallelverschiebung für den Beton mit Gesteinskörnung SKH nicht festgestellt. Die Alkalikonzentration lag hier zum Teil über der des Referenzbetons. Da im Vergleich zu diesem lediglich die Gesteinskörnung ausgetauscht wurde, ist anzunehmen, dass bei dieser Temperatur ggf. Alkalien aus dem zu 15 M.-% in der Gesteinskörnung enthaltenen Feldspat freigesetzt wurden [Ber 04]. Um dies abschließend zu klären bedarf es weiterer Untersuchungen, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht durchzuführen waren.

Die Auswertung der Porenlösungszusammensetzung in Bezug auf den Beginn einer AKR ergab, dass sie bei Verwendung von Gesteinskörnung SKH bei Lagerung SAL-K und NK40-K nach 28d und bei Lagerung U60-K bereits nach 7d eingesetzt hat. Die in der rechten Bildreihe von Bild 4-22 dargestellten Dehnungsverläufe weisen für Lagerung SAL bisher auf keinerlei Gefügeschädigung hin. Auch in der Praxis war bei dieser Gesteinskörnung bisher immer ein Zeitraum von mindestens 2 Jahren bis zu ersten Schäden erforderlich. Bei Lagerung NK40 wurde dagegen ab einem Alter von 56d eine Dehnung infolge von Gefügeschäden verzeichnet. Bei Lagerung Ü60 muss sogar davon ausgegangen werden, dass eine Gefügeschädigung bereits vor dem ersten Messtermin nach 28d eingesetzt hat. Die AKR an sich muss jeweils vor diesen Zeitpunkten begonnen haben. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus den Porenlösungsanalysen zuvor. Weiterhin deutet sich an, dass der Zeitraum zwischen dem Beginn einer AKR und ersten Gefügeschäden mit zunehmender Temperatur kleiner wird.

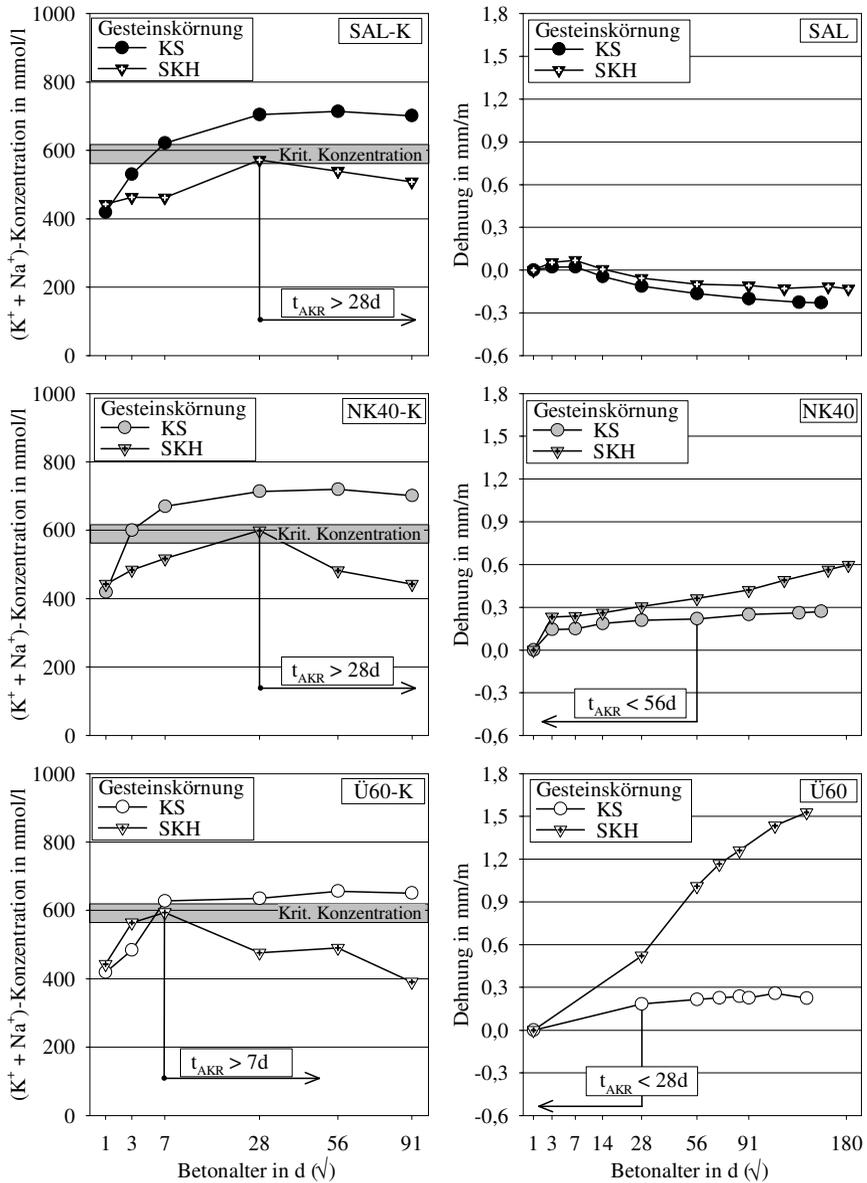


Bild 4-22: Ableitung des Beginns einer AKR mit silifiziertem Kalkstein und Hornstein (SKH) anhand der Alkalikonzentration in der Porenlösung und der Dehnung des Betons bei unterschiedlichen Lagerungen (KS = Referenzbeton mit Kalkstein (KS))

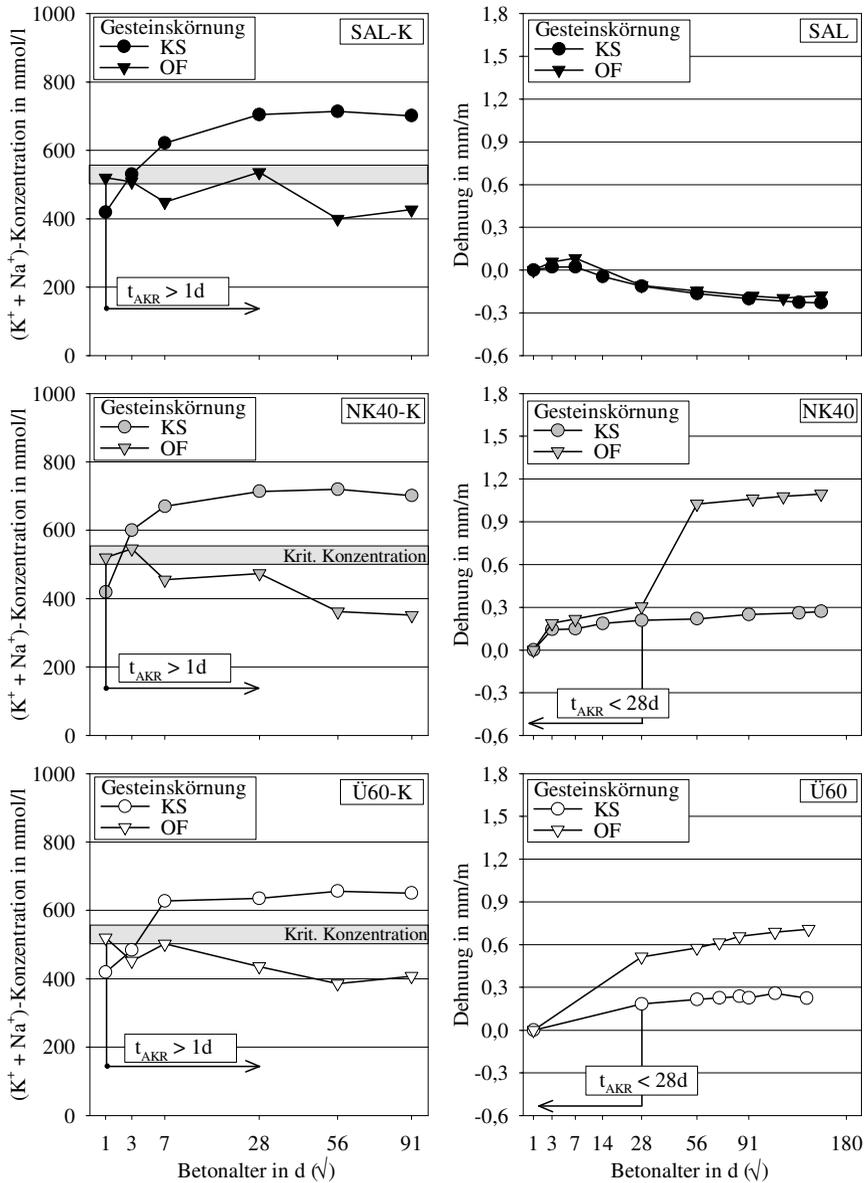


Bild 4-23: Ableitung des Beginns einer AKR mit Opalsandstein und Flint (OF) anhand der Alkalikonzentration in der Porenlösung und der Dehnung des Betons bei unterschiedlichen Lagerungen (KS = Referenzbeton mit Kalkstein (KS))

#### 4.3.1.5 AKR mit Opalsandstein und Flint (OF)

Wie aus der linken Bildreihe von Bild 4-23 ersichtlich, lag die kritische Konzentration für norddeutschen Kies mit Opalsandstein und Flint bei rd. 520 mmol/l. Diese Konzentration wurde unabhängig vom Temperaturregime bereits nach 1d erreicht. Gleichzeitig lag die Alkalikonzentration damit deutlich über der im Referenzbeton. Da gegenüber diesem nur ein Teil der Gesteinkörnung ausgetauscht wurde, muss wiederum angenommen werden, dass Alkalien aus einer der im norddeutschen Kies enthaltenen Gesteinsarten freigesetzt wurden. Feldspäte und Glimmer kommen dafür in Betracht. Insbesondere in diesem Fall liefert demnach die alkaliempfindliche Gesteinskörnung selbst einen Großteil der für eine AKR notwendigen Alkalien.

Im weiteren Verlauf überlagerten sich Alkalifreisetzung infolge Zementhydratation und Alkalibindung infolge AKR. Bis zum Alter von 7d überwog die Alkalibindung (kleinerer bzw. negativer Anstieg im Vergleich zum Referenzbeton). Auf Grund des nachfolgend annähernd parallelen Verlaufs bei Lagerung SAL-K und NK40-K hätte, wie im Abschnitt zuvor, auch geschlussfolgert werden können, dass die frühe Alkalibindung nur auf eine oberflächliche nicht schädigende Reaktion zurückzuführen ist und eine schädigende AKR erst im Alter von 28d einsetzt. Da jedoch, wie Bild B-10 zeigt, bereits in diesem Alter Gelausscheidungen auf den Würfeloberflächen festgestellt wurden, musste eine schädigende AKR in der Gesteinkörnung bereits früher abgelaufen sein. Bei Lagerung Ü60-K traten bereits nach 7d massive Gelausscheidungen auf. Zusätzlich bestätigten auch die Dehnungsverläufe bei Lagerung NK40 und Ü60 (rechter Teil Bild 4-23), dass eine AKR im Zeitraum vor 28d stattgefunden haben musste. Ab diesem Zeitpunkt, bei Lagerung Ü60 ggf. deutlich früher, wurden gegenüber dem Referenzbeton größere Dehnungen festgestellt. Bei Lagerung SAL wurden im dargestellten Prüfzeitraum wiederum keine Dehnungen verzeichnet. Jedoch wurden nach 9 Monaten augenscheinlich Risse und eine ansteigende Dehnung beobachtet. Die bisherigen Erfahrungen mit der Gesteinkörnung OF im Außenlager wurden damit für Lagerung SAL bestätigt. Schlussendlich fällt beim Vergleich der Zeitpunkte zwischen Beginn einer AKR und einsetzender Gefügeschädigung wiederum auf, dass der Abstand zwischen diesen Ereignissen mit zunehmender Temperatur kleiner wird.

#### 4.3.1.6 Reaktion weiterer Zementhauptbestandteile

Die Ergebnisse zur Reaktionskinetik der weiteren Hauptbestandteile neben Portlandzementklinker sind im Anhang B in den Bildern B-11 bis B-13 dargestellt. Im Hinblick auf die Alkalikonzentration der Porenlösung fällt zunächst auf, dass gegenüber der um den Faktor  $V_{HB,PL}$  abgeminderten Alkalikonzentration der Porenlösung des Referenzbetons die Alkalikonzentration in jungem Be-

tonalter und unabhängig von der Lagerungstemperatur die Alkalikonzentration deutlich höher war, wenn Hüttensand, Flugasche oder Silikastaub eingesetzt wurden. Als Ursache hierfür kommen eine beschleunigte Reaktion des Klinkeranteils im Zement (Keimwirkung der Hauptbestandteile) oder eine Alkalifreisetzung durch den weiteren Hauptbestandteil in Betracht. Auf Grund der parallel am Zementstein bestimmten nahezu unveränderten CH-Anteile im Vergleich zum Zementstein mit Zement CEM I (1,3), ist ersteres weitgehend auszuschließen. Entsprechend ist unter den gegebenen Bedingungen von einer signifikanten Alkalifreisetzung durch die weiteren Hauptbestandteile auszugehen. Für Hüttensand und Flugasche wurde dies bereits für ein Zementsteinalter von 28d und Anteilen im Zement von 20 % gezeigt [Sch 04]. Offensichtlich ist dies Verhalten auch auf jungen Beton < 28d und auf Silikastaub als Hauptbestandteil im Zement zu erweitern.

Im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden AKR bedeutet das, dass entgegen der Zielstellung die Alkalikonzentration der Porenlösung in sehr jungem Betonalter (< 3d) nicht zwangsläufig abgemindert wird. Bei niedriger kritischer Alkalikonzentration kann das zu einer ungewollt frühen AKR führen. Wurde dagegen der kritische Alkaligehalt noch nicht erreicht, entscheidet die weitere Kinetik und damit verbundene Alkalibindung über die Auswirkung der weiteren Hauptbestandteile im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden AKR. Sie wird im Folgenden ausgewertet.

#### Flugasche V

Für Lagerung SAL-K zeigt Bild B-11, dass die Flugasche ab einem Beton- bzw. Zementsteinalter von  $t_{HB} = 28d$  reagiert hat. Sie verhielt sich damit trotz Wechsellagerung in etwa wie bei konstant 20 °C [Sch 04]. Für die beiden übrigen Lagerungen NK40-K und Ü60-K sind die Ergebnisse nicht eindeutig. Während ein Einfluss auf die Alkalikonzentration (Alkalibindung) bei beiden Lagerungen nach  $t_{HB} = 3d$  deutlich wurde, zeigt der Verbrauch an CH an, dass die Flugasche nach  $t_{HB} = 7d$  (NK40-K) bzw.  $t_{HB} = 1d$  (Ü60-K) begonnen hat zu reagieren. Dennoch ist daraus unzweifelhaft zu schließen, dass die Reaktion der Flugasche bei erhöhten Temperaturen angeregt wird. Für die weitere Auswertung werden auf Grund der größeren Unsicherheit bei der Analyse der Porenlösungskonzentrationen und dem „reineren“ System des Zementsteins letztgenannte Werte zu Grunde gelegt.

#### Silikastaub D

Die Verhältnisse bei Verwendung von Silikastaub als weiteren Hauptbestandteil sind eindeutig (Bild B-12). Während der praxisnahen Lagerung wirkte sich der Silikastaub ab einem Alter von  $t_{HB} = 3d$  vermindern auf die Alkalikonzentration der Porenlösung und den CH-Anteil im Zementstein aus. Während der Lagerungen in Anlehnung an die Laborprüfungen reagierte der Silikastaub jeweils

bereits nach  $t_{\text{HB}} = 1\text{d}$ . Die Reaktion wurde durch die erhöhten Temperaturen beschleunigt.

### Hüttensand S

Durch die unerwartet starke anfängliche Alkalifreisetzung und nur geringe Alkalibindungskapazität [Sch 04] ließ sich die Reaktion des Hüttensands nicht zuverlässig anhand der Alkalikonzentration der Porenlösung bewerten (Bild B-13). Über den CH-Gehalt im Zementstein konnte jedoch festgestellt werden, dass der Hüttensand ähnlich schnell reagierte wie der Silikastaub ( $t_{\text{HB}} = 3\text{d}$  für Lagerung SAL-K und  $t_{\text{HB}} = 1\text{d}$  für Lagerung NK40-K und Ü60-K).

#### 4.3.1.7 Abfolge der Einzelreaktionen

Mit den zuvor dargelegten Ergebnissen lassen sich der Beginn einer AKR mit dem der Reaktion der weiteren Hauptbestandteile im Zement bei den untersuchten Temperaturregimes der Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K vergleichen. Bild 4-24 zeigt diesen Vergleich.

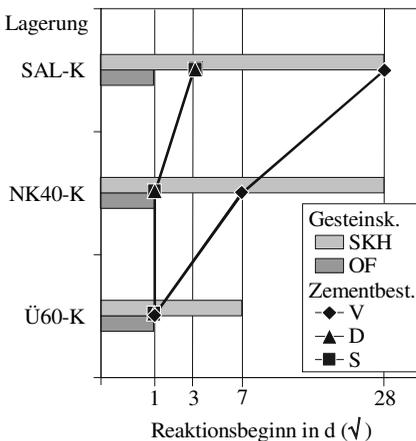


Bild 4-24: Reaktionsbeginn weiterer Hauptbestandteile im Zement sowie einer AKR im Vergleich bei verschiedenen Temperaturregimes

Eine potentiell schädigende AKR bei Verwendung von Gesteinskörnung OF setzt danach vor oder gleichzeitig mit der Reaktion der hier verwendeten weiteren Hauptbestandteile ein. Ersteres galt grundsätzlich bei Lagerung SAL-K und teilweise bei Verwendung von Flugasche. Mit höherer Lagerungstemperatur rückte jedoch der Reaktionsbeginn der Flugasche zunehmend an den Reaktionsbeginn einer AKR heran, so dass bei Lagerung Ü60-K beide Reaktionen gleichzeitig anfangen. Bei Verwendung von Hüttensand bzw. Silikastaub war dies bereits bei Lagerung NK40-K der Fall. Der Reaktionsbeginn der weiteren Hauptbestandteile verschiebt sich damit bei erhöhter Lagerungstemperatur tendenziell in Richtung des Reaktionsbeginns einer AKR mit Gesteinskörnung OF.

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine AKR durch die Verwendung von Puzzolanen oder Hüttensand vermieden werden kann, steigt somit mit höherer Lagerungstemperatur an. Das ist gleichbedeutend mit einer ansteigenden Gefahr, die Wirksamkeit von Puzzolanen oder Hüttensanden im Labor falsch einzuschätzen.

Dieser Zusammenhang wurde besonders bei der Kombination von Flugasche als Hauptbestandteil und Gesteinskörnung SKH deutlich. Während bei praxisnaher Lagerung SAL-K AKR und puzzolanische Reaktion gleichzeitig abliefen, setzte die Reaktion der Flugasche bei erhöhten Lagerungstemperaturen deutlich vor der AKR ein. Die Reaktion von Hüttensand bzw. Silikastaub begann dagegen stets vor einer AKR mit Gesteinskörnung SKH, so dass bei diesen Kombinationen eine Fehleinschätzung weniger wahrscheinlich ist.

### *4.3.2 Abnahme der Alkalikonzentration und des CH-Anteils*

#### *4.3.2.1 Allgemeines*

Der Beginn der puzzolanischen Reaktion vor einer AKR schließt nicht ein, dass eine AKR auch vermieden wird. Umgekehrt heißt ein paralleler oder verspäteter Reaktionsbeginn nicht zwangsläufig, dass eine AKR mit dem eingesetzten weiteren Hauptbestandteil im Zement nicht vermieden werden kann. Ursache dafür ist, dass neben dem Reaktionsbeginn entscheidend ist, ob das Erreichen der in den Abschnitten 4.3.1.4 und 4.3.1.5 aufgezeigten kritischen Alkalikonzentration der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung unterbunden wird.

Neben einer potentiellen Alkalibindung durch die Reaktionsprodukte vor allem der weiteren Hauptbestandteile sind vor diesem Hintergrund Alkalianteile zu berücksichtigen, die ggf. durch die weiteren Hauptbestandteile freigesetzt werden (Abschnitt 4.3.1.6). Zusätzlich ist eine prinzipielle Verdünnung der Porenlösung mit ins Kalkül zu ziehen (Abschnitt 4.3.1.2.2), die mit zunehmendem Anteil im Zement größer wird. In Abhängigkeit der hier untersuchten Temperaturregimes lassen sich die genannten Parameter nicht separat darstellen. Um dennoch einen Eindruck zu bekommen, wurden die zeitlichen Verläufe der Alkalikonzentration im Beton einander gegenübergestellt. Als Anhaltspunkt zur Bewertung wurde der Bereich des kritischen Alkaligehalts der Gesteinskörnung OF mit in die Grafiken eingetragen. Wie in Abschnitt 2.1.4.3 dargestellt, kann auch der CH-Anteil im Beton eine AKR, vor allem bei porösen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, positiv beeinflussen. Deshalb wurde auch der CH-Haushalt der parallel hergestellten Zementsteine vergleichend ausgewertet.

#### 4.3.2.2 CEM II/A-V

Für Zement CEM II/A-V sind die Verhältnisse im Beton bzw. Zementstein in Bild 4-25 dargestellt. Die z.T. erheblichen Unterschiede zwischen den Temperaturregimes der Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K werden auf Anhieb deutlich. Bei Lagerung SAL-K wurde bereits zwischen 3d und 7d die kritische Alkalikonzentration in der Porenlösung des Betons erreicht (linker Teil von Bild 4-25). Nach 28d war die Alkalikonzentration  $> 600$  mmol/l, so dass selbst bei Verwendung der Gesteinskörnung SKH eine AKR in der Gesteinskörnung auftreten könnte. Im weiteren Verlauf fiel die Alkalikonzentration durch eine einsetzende Alkalibindung wieder ab. Bei Lagerung NK40-K dagegen reichte die bereits nach 7d einsetzende Alkalibindung aus, die Alkalikonzentration unterhalb der kritischen Konzentration von 520 mmol/l zu halten (7d = 469 mmol/l).

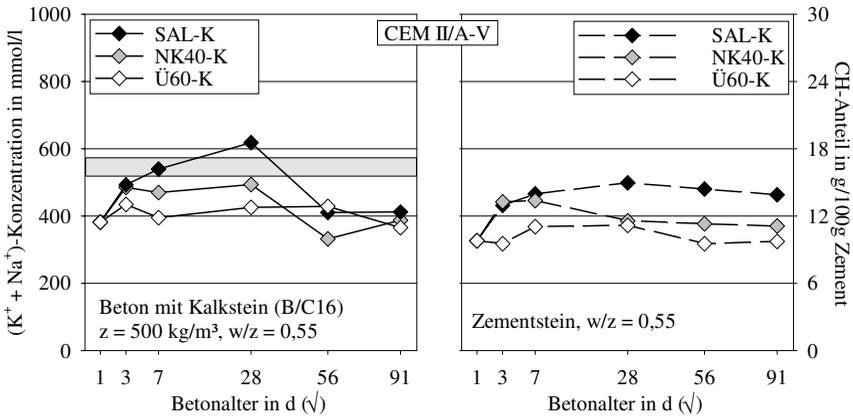


Bild 4-25: Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton und CH-Gehalt im Zementstein in Abhängigkeit vom Temperaturregime (konservierte Lagerung) bei Verwendung von Zement CEM II/A-V

Gleiches galt für Lagerung Ü60-K mit dem Unterschied, dass die Alkalien auf Grund der höheren Temperatur und schnelleren Reaktion zeitlich noch effektiver gebunden wurden (7d = 389 mmol/l). Nach 56 d wurde dieser Wert in etwa auch von den beiden anderen Lagerungen erreicht. Die Wahrscheinlichkeit einer schädigenden AKR nimmt somit bei steigender Lagerungstemperatur ab. Die Wirksamkeit der Flugasche zur Vermeidung einer schädigenden AKR wird dadurch umso mehr überschätzt, je höher die Lagerungstemperatur ist.

Die Verläufe des CH-Gehalts im Zementstein wiesen ebenfalls Unterschiede zwischen den Temperaturregimes auf. Höhere CH-Gehalte ab einem Alter von 7d bei Lagerung SAL-K könnten eine Gefügeschädigung infolge einer AKR in der Gesteinskörnung unterstützen. Auf Grund etwa gleich großer CH-Anteile bei Lagerung NK40-K und Ü60-K im Alter von 91d und einer noch nicht abge-

geschlossenen Reaktion der Flugasche bei Lagerung SAL-K zeichnet sich ab, dass langfristig gleiche CH-Anteile erreicht werden könnten.

#### 4.3.2.3 CEM II/A-D

Bei Verwendung von Silikastaub als Hauptbestandteil im Zement (CEM II/A-D) fielen die Differenzen noch größer aus (Bild 4-26). Während bei Lagerung SAL-K die kritische Alkalikonzentration mit 512 mmol/l nach 3d knapp erreicht wurde, konnten zum selben Zeitpunkt bei den übrigen Lagerungen nur noch Konzentrationen von rd. 330 mmol/l (NK40-K) und 220 mmol/l (Ü60-K) festgestellt werden.

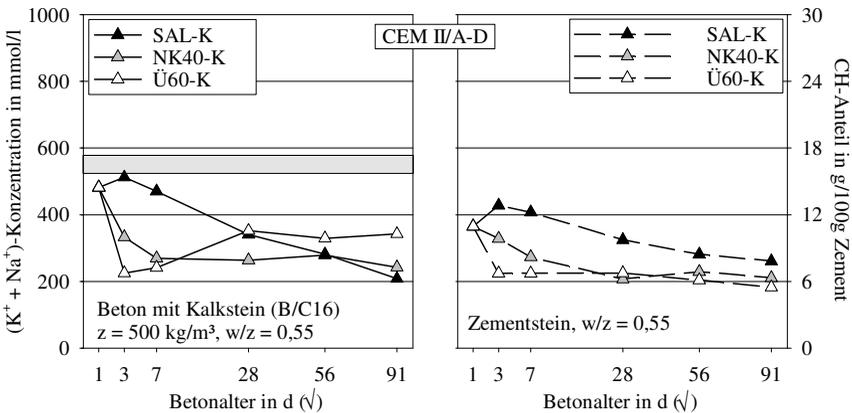


Bild 4-26: Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton und CH-Gehalt im Zementstein in Abhängigkeit vom Temperaturregime (konservierte Lagerung) bei Verwendung von Zement CEM II/A-D

Im weiteren Verlauf sank bei Lagerung SAL-K die Alkalikonzentration in der Porenlösung stetig weiter ab. Demgegenüber war der weitere Verlauf bei Lagerung NK40-K annähernd konstant. Bei Lagerung Ü60-K stieg die Alkalikonzentration zwischen 7d und 28d wieder deutlich an. Mit dem Unterschied, dass die erneute Alkalifreisetzung deutlich früher einsetzte, ist dies konform mit Beobachtungen in [Sch 04] (siehe auch Bild 2-16).

Es ist fraglich, ob das nur kurze Überschreiten der kritischen Konzentration zur Auslösung der AKR ausreicht. Doch sowohl die Konzentrationsverläufe in den Abschnitten 4.3.1.4 und 4.3.1.5 als auch die in Abschnitt 2.4.5.2 dargestellten Ergebnisse sprechen gegen diese Unsicherheit. Unzweifelhaft ist dagegen, dass wiederum die Verhältnisse unter realen Bedingungen während der Lagerung bei erhöhten Temperaturen im frühen Betonalter bis 28d falsch abgebildet werden

und so Fehlinterpretationen hinsichtlich der Wirksamkeit des Silikastaubs möglich sind.

Entsprechend den Differenzen bei der Alkalikonzentration zwischen den Lagerungen wurden auch deutliche Unterschiede im CH-Anteil im Zementstein festgestellt. Nach etwa gleichem Startwert wie bei Verwendung von Zement CEM II/A-V bewegten sich die CH-Gehalte auf einem deutlich geringeren Niveau. Nach 91d lag der Gehalt unabhängig von der Lagerung in etwa bei 6g/100g Zement.

#### 4.3.2.4 CEM II/A-S

Im Gegensatz zu den puzzolanhaltigen Zementen wurden bei Verwendung von CEM II/A-S nur minimale und zudem nicht entsprechend der Temperatur gereichte Alkalikonzentrationen und CH-Gehalte ermittelt (Bild 4-27). Der kritische Alkaligehalt wurde in allen Fällen im Alter von 3d bis 7d erreicht. Durch einen weiteren Anstieg der Konzentration wurde nach 91d sogar die kritische Alkalikonzentration für Gesteinskörnung SKH von 600 mmol/l erreicht.

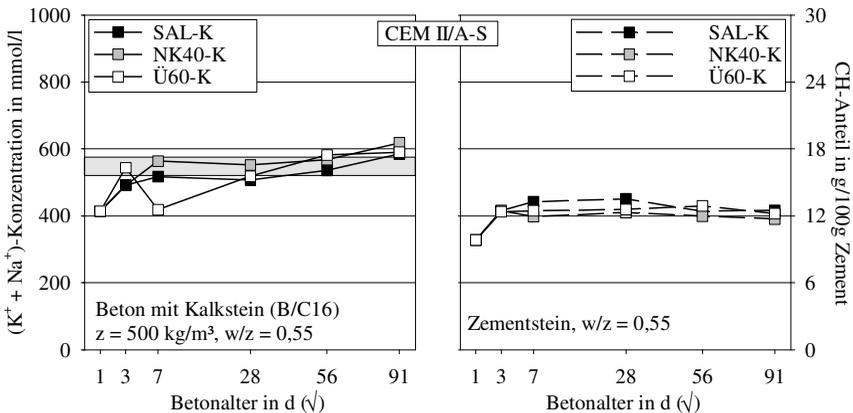


Bild 4-27: Alkalikonzentration der Porenlösung im Beton und CH-Gehalt im Zementstein in Abhängigkeit vom Temperaturregime (konservierte Lagerung) bei Verwendung von Zement CEM II/A-S

Insgesamt kann für Hüttensand als Hauptbestandteil im Zement eine Abhängigkeit der Alkalikonzentration der Porenlösung von der Lagerungstemperatur weitgehend ausgeschlossen werden. Das gilt auch für den CH-Anteil im Zementstein.

#### 4.3.3 Abnahme des transportwirksamen Kapillarporenanteils

Als transportwirksamer Porenraum wird i.d.R. der Kapillarporenraum angesehen. Er umfasst den Porenraum der Porenradien, die  $< 10 \mu\text{m}$  und größer als Gelporen sind. Die Abgrenzung zu den Gelporen wird unterschiedlich gesetzt. In [Rom 78, Smo 76] wurde auf Grund systematischer Untersuchungen ein Grenzwert von  $0,03 \mu\text{m}$  definiert. In früheren Arbeiten wurde ein minimaler Durchmesser von  $0,01 \mu\text{m}$  genannt [Pow 46; Wis 61]. Dieser wurde durch einen allgemeinen Ansatz zur Charakterisierung der Porenstruktur zementgebundener Stoffe in [Men 98] bestätigt. In dieser Arbeit wird deshalb letztgenannter Wert zu Grunde gelegt.

Zur Darstellung möglicher Unterschiede im transportwirksamen Kapillarporenraum, die eine AKR wie in Abschnitt 2.3.3.4 beschrieben, beeinflussen können, wurde wie folgt vorgegangen: Aus der gemäß Abschnitt 6.1.4.3 bestimmten Poreneingangsradienverteilung des Betons B8 mit CEM I (1,3) sowie der Betone B10 bis B12 mit CEM II-Zementen wurde das kumulierte Porenvolumen in Abhängigkeit der Porenradien ermittelt. Es ist für die verschiedenen konservierten Lagerungen in den Bildern B-14 bis B-17 dargestellt (unkonserviert gelagerte Proben führten zu vergleichbaren Ergebnissen). Aus dieser Darstellung ließ sich das Kapillarporenvolumen  $< 0,01 \mu\text{m}$  entnehmen. Es ist in Bild 4-28 für die verschiedenen Zemente und Lagerungen (Temperaturregimes) zusammengefasst. Zusätzlich wurde der Medianradius der Poreneingangsradienverteilung abgelesen, bei dem genau 50 Vol.-% des insgesamt eingedrungenen Quecksilbervolumens eingepresst wurden. Er charakterisiert die ungefähre Lage der Poreneingangsradienverteilung und ist darüber hinaus wegen der einfachen und eindeutigen Bestimmung zwischen verschiedenen Proben gut vergleichbar [Här 95]. Die Medianradien der betrachteten Proben sind ebenfalls in Bild 4-28 enthalten.

Aus dem linken Teil des Bildes geht hervor, dass sowohl Medianradius als auch Kapillarporenraum in Abhängigkeit vom Temperaturregime im Betonalter von 7d deutlich voneinander abweichen. Bei Verwendung von CEM I (1,3) und CEM II/A-V liegen die Kapillarporenvolumina bei Lagerung SAL-K und NK40-K noch nah beieinander. Bei  $60^\circ\text{C}$  (Ü60-K) fiel er dann um ca. 25 % ab. Der Medianradius nahm dagegen annähernd linear mit ansteigender Temperatur ab. Das zeigt an, dass zwar bei  $40^\circ\text{C}$  (NK40-K) das Kapillarporenvolumen in etwa mit dem bei  $20^\circ\text{C}$  (SAL-K) vergleichbar ist, jedoch eine Verfeinerung der Porenstruktur eingesetzt hat. Bei Verwendung von CEM II/A-S und CEM II/A-D fiel der Medianradius entsprechend dem Kapillarporenvolumen ab (Verfeinerung der Porenstruktur gleich Verschiebung in Gelporenbereich). Nach 7d betrug das Kapillarporenvolumen bei Lagerung NK40-K und Ü60-K nur noch etwa 2/3 dessen bei praxisnaher Lagerung SAL-K. Bezüglich etwaiger Transportmechanismen bedeutet das, dass der durch die Porenstruktur bedingte Wi-

derstand bei Lagerung NK40-K bzw. Ü60-K gegenüber einer praxisnahen Lagerung deutlich erhöht ist. Wasser und Ionen können weniger gut an den Ort der Reaktion bzw. des quellenden ASHs gelangen und verzögern oder verhindern so ggf. eine schädigende AKR.

Im Gegensatz dazu sind die Transportbedingungen bezogen auf die Gefügestruktur nach 91d (rechter Teil von Bild 4-28) in etwa vergleichbar. Die Kapillarvolumina und Medianradien in Abhängigkeit der Lagerung lagen auf einem vergleichbaren Niveau bzw. stiegen mit höherer Temperatur geringfügig an (Ü60-K + CEM II/A-S; CEM II/A-D). Das ist ggf. auf Phasenumwandlungen der Reaktionsprodukte von Hüttensand und Silikastaub zurückzuführen, soll hier aber nicht weiter betrachtet werden.

Die Ergebnisse bedeuten, dass in Abhängigkeit des Temperaturregimes bei der Prüfung im frühen Betonalter deutliche Unterschiede hinsichtlich etwaiger Transportmechanismen vorliegen. Höhere Temperaturen führen dabei zu größeren Transportwiderständen und damit zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit einer schädigenden AKR. Langfristig (> 91d) gleichen sich die Transportbedingungen jedoch wieder einander an.

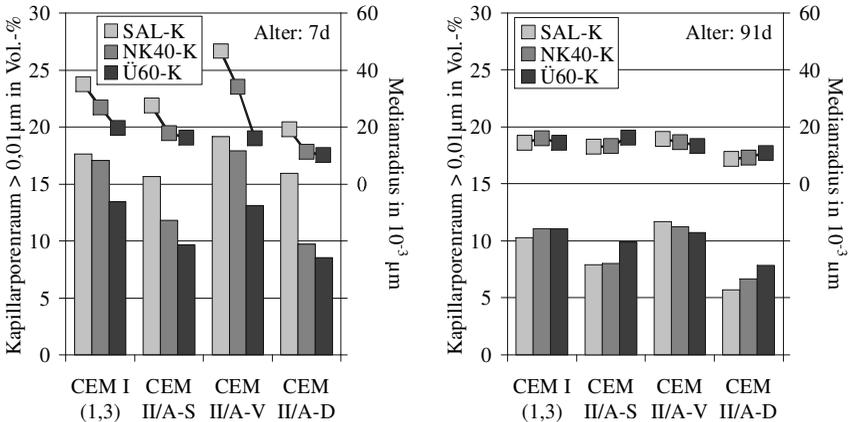


Bild 4-28: Transportwirksamer Kapillarporenraum und Medianradius der Poreneingangsradienverteilung des Feinmörtelanteils im Beton in Abhängigkeit von der eingesetzten Zementart und der Lagerung (Temperaturregime), links im Betonalter von 7d und rechts im Betonalter von 91d

#### 4.3.4 Verringerung des pH-Werts der Porenlösung

Der pH-Wert der Porenlösung wird messtechnisch durch deren Hydroxidionenkonzentration bestimmt. Unter Berücksichtigung der mit den Hydroxidionen im Gleichgewicht stehenden Ionen in der Porenlösung lässt er sich jedoch auch wie folgt berechnen.

$$\text{pH}_{\text{cal}} = 14 - \lg(c_{\text{Na}^+} + c_{\text{K}^+} + 2 \cdot c_{\text{Ca}^{2+}} - 2 \cdot c_{\text{SO}_4^{2-}}) \quad [-] \quad \text{Gl. 4-5}$$

mit	$c_{\text{Na}^+}$	Natriumionenkonzentration in mol/l
	$c_{\text{K}^+}$	Kaliumionenkonzentration in mol/l
	$c_{\text{Ca}^{2+}}$	Calciumionenkonzentration in mol/l
	$c_{\text{SO}_4^{2-}}$	Sulfationenkonzentration in mol/l

Für Zementstein, der bei 20 °C gelagert wird und älter als 2d ist, können die Calcium- und Sulfationen auf Grund sehr geringer Konzentrationen bei der Berechnung vernachlässigt werden [Sch 04]. Demgegenüber ist für höhere Lagerungstemperaturen bekannt, dass Ettringit zunehmend instabil und zu Monosulfat umgesetzt wird, entsprechend Sulfationen in die Porenlösung freigesetzt werden, und der pH-Wert sich aus Gleichgewichtsgründen reduziert (Abschnitt 2.2.3.1). In Abschnitt 2.1.4.2 wurde weiterhin dargelegt, dass die Löslichkeit der Kieselsäure insbesondere bei pH-Werten > 9 stark vom diesem abhängig ist. Zusammengenommen kann somit der Abfall des pH-Werts durch die Instabilität von Ettringit die Wahrscheinlichkeit einer AKR bei erhöhten Temperaturen abmindern.

Um zu überprüfen, inwiefern dieser Zusammenhang für die hier untersuchten Lagerungen relevant ist, wurde die Sulfationenkonzentration der Porenlösung der Betone B8 mit CEM I (1,3) und B9 mit CEM I-NA bis zum Alter von 28d zunächst bei allen Lagerungen mitbestimmt und der pH-Wert ohne und mit Berücksichtigung der Sulfationenkonzentration berechnet. Wie Bild 4-29 und Tafel A-21 und B-22 zu entnehmen ist, wurde für die Lagerung SAL(-K) und NK40(-K) kein merklicher Unterschied festgestellt. Ein Einfluss etwaiger freigesetzter Sulfationen konnte somit für diese Lagerungen ausgeschlossen werden und braucht nicht berücksichtigt zu werden. Die in den Abschnitten zuvor dargestellte Alkalikonzentration stimmt daher mit der den pH-Wert bestimmenden Hydroxidionenkonzentration überein.

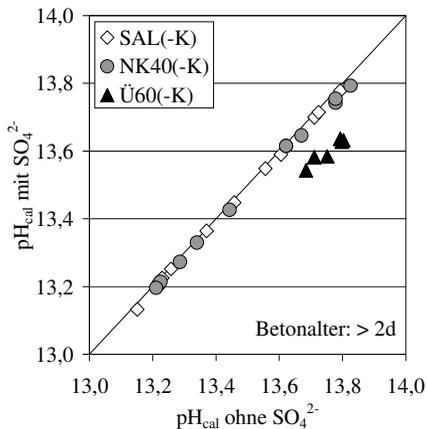


Bild 4-29: Berechnete pH-Werte ( $pH_{cal}$ ) mit und ohne Berücksichtigung der Sulfationenkonzentration in der Porenlösung

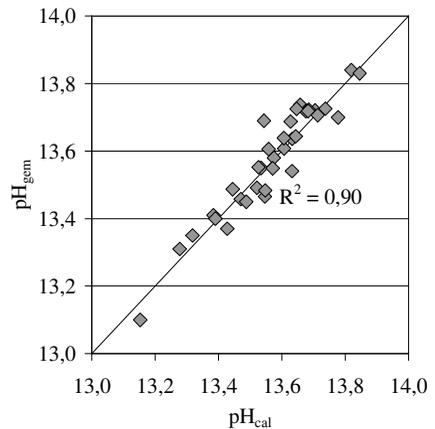


Bild 4-30: Gegenüberstellung berechneter und titrimetrisch ermittelter pH-Werte verschiedener Betone und Lagerungen

Bei Lagerung Ü60(-K) hingegen war der unter Berücksichtigung der Sulfationen berechnete  $pH_{cal}$ -Wert stets deutlich kleiner. Die Sulfationenkonzentration der Porenlösung war infolge der Instabilität des Ettringits so groß, dass die Hydroxidionenkonzentration der Porenlösung und damit der pH-Wert der Porenlösung abgenommen haben. Entsprechend geringer fällt der Angriff auf etwaige vorliegende alkaliempfindliche Kieselsäure bei Lagerung Ü60(-K) aus. Ggf. wird er jedoch auch durch eine höhere Löslichkeit der Kieselsäure bei höheren Temperaturen ausgeglichen. Eine abschließende Bewertung ist hier diesbezüglich nicht möglich. Dennoch sollte bei einer Bewertung des Alkaliangriffs mittels des berechneten pH-Werts die Sulfationenkonzentration bei dieser Lagerung immer mit berücksichtigt werden.

Zur Verifizierung der obigen Ergebnisse wurde der pH-Wert ausgewählter Porenlösungsproben auch titrimetrisch ermittelt und dem berechneten Wert  $pH_{cal}$  gegenübergestellt. Bild 4-30 zeigt, dass die gemessenen und berechneten Werte gut übereinstimmen. Es bestätigt damit die Richtigkeit des zuvor vorgeschlagenen Vorgehens. Sowohl die entsprechend den Ausführungen berechneten  $pH_{cal}$ -Werte als auch die gemessenen pH-Werte sind in den Tafeln A-21 bis A-27 enthalten.

#### 4.3.5 Zusammenfassung

Die in den Abschnitten zuvor dargestellten Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass sich neben den Feuchtebedingungen während der Laborprüfung auch die Temperatur maßgeblich auf die Voraussetzungen für eine AKR und damit auf das Ergebnis einer Laborprüfung auswirken kann. In Abhängigkeit der Temperaturbedingungen bei den in dieser Arbeit berücksichtigten Lagerungen (konservierte Bedingungen) wurden folgende Erkenntnisse in Bezug auf die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen auf praktische Verhältnisse gewonnen.

##### Lagerung SAL-K

Diese Lagerung wurde zur Simulation der im FIZ durchgeführten Außenlagerung entwickelt. Entsprechend wurden das Temperaturregime und die Lagerungszyklen gewählt. In Bezug auf den Temperatureinfluss auf das Auftreten einer AKR gab es keine Hinweise, die auf Verschiebungen im Vergleich zur Außenlagerung hindeuten. Erste Dehnungen und feine Risse an Betonbalken mit CEM I (1,3) und Gesteinskörnung OF im gleichen Alter wie während einer Außenlagerung üblich bestätigten dies. Insgesamt konnte daher diese Lagerung als Referenz zur Beurteilung der übrigen Lagerungen verwendet werden.

##### Lagerung NK40-K

Alle eingesetzten Hauptbestandteile im Zement zeigen gegenüber der Referenzlagerung (SAL-K) eine beschleunigte Reaktion bei einer Temperatur von 40 °C. Die Alkalikonzentration nimmt entsprechend eher ab, wenn bei der Bildung der Reaktionsprodukte Alkalien eingebunden werden. Dies ist bei Verwendung von Flugasche und Silikastaub der Fall (maximale Differenz von -20 % (V) bzw. -40 % (D) bis zum Betonalter von 28d). Gleichzeitig wird die für eine AKR unterstützende Wirkung von frei verfügbarem CH durch dessen verfrühte Umsetzung durch die Puzzolane ebenfalls abgemindert. Die Gefahr, eine AKR bei dieser Lagerung zu unterschätzen, ist daher insbesondere bei Verwendung von Puzzolanen gegeben.

Zusätzlich zeigte sich, dass unabhängig von den eingesetzten Bestandteilen des Zements das transportrelevante Kapillarporenvolumen bereits im frühen Betonalter von 7d deutlich kleiner ist als bei einer an die Praxis angelehnten Lagerung. Transportvorgänge (Alkalidiffusion, Wassertransport) werden entsprechend behindert und eine AKR unterbunden. Die Gefahr einer Fehleinschätzung erhöht sich.

In älteren Betonen (> 56d (D), > 91d (PZ, V, S)) scheinen sich die Verhältnisse wieder einander anzugleichen, d.h. Alkalikonzentration der Porenlösung, CH-Anteil und Kapillarporosität im Zementstein entsprechen wieder denjenigen unter praxisnahen Bedingungen.

### Lagerung Ü60-K

Die Ausführungen zu Lagerung NK40-K gelten in noch klarerer Ausprägung auch für Lagerung Ü60-K (maximale Differenz von -30 % (V) bzw. -60 % (D) bis zum Betonalter von 28d).

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der pH-Wert der Porenlösung auf Grund einer bei dieser Lagerung einsetzenden Instabilität von Ettringit kleiner wird. Ggf. wird dadurch der Angriff auf die alkaliempfindlichen Bestandteile reduziert. Für Beton mit CEM I-Zement wurde zusätzlich eine grundsätzlich um rd. 50 mmol/l kleinere Alkalikonzentration beobachtet. Eine Ursache konnte dafür nicht gefunden werden, Verschiebungen im thermodynamischen Gleichgewicht zwischen gelösten und gebundenen Alkalien sind jedoch denkbar. Ob und inwiefern durch diese beiden Phänomene eine AKR weniger wahrscheinlich wird (Fehleinschätzung möglich), kann nicht abschließend beurteilt werden. Da mit höherer Lagerungstemperatur die Löslichkeit der alkaliempfindlichen Bestandteile und damit Reaktionsgeschwindigkeit bei einer AKR ansteigen, werden sie jedoch ggf. wieder ausgeglichen.

Letztlich hat sich gezeigt, dass Gesteinskörnung SKH bei einer Lagerungstemperatur von 60 °C bereits im sehr jungen Alter Alkalien freisetzen kann. Ggf. kann es so schneller zu einer AKR kommen, als in der Praxis zu erwarten wäre. Die Gefahr einer AKR würde so überschätzt.

Über diese Zusammenhänge hinaus wurden einige weitere wesentliche Beobachtungen gemacht, die zum Teil Voraussetzungen für die Auswertung bilden, sich jedoch nicht auf die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen auswirken. Bezüglich einer Alkalifreisetzung durch die Gesteinskörnung wurde deutlich, dass Gesteinskörnung OF ebenfalls Alkalien freisetzt, jedoch unabhängig von der Temperatur grundsätzlich sehr früh. Gleiches gilt für die hier eingesetzten weiteren Hauptbestandteile in den CEM II-Zementen: Hüttsand, Flugasche oder Silikastaub. Dies kann dazu führen, dass die in dieser Arbeit festgestellte, für das Auftreten einer AKR offenbar notwendige kritische Alkalikonzentration in der Porenlösung des Betons früher erreicht wird, als es ggf. bei einem Zement mit gleicher Menge Kalkstein als weiterem Hauptbestandteil der Fall ist (hier nicht untersucht).

Die kritische Alkalikonzentration selbst scheint nach den hier dargestellten Untersuchungen auch unabhängig von der vorherrschenden Temperatur zu sein. Sie liegt für Gesteinskörnung SKH bei 600 mmol/l und für Gesteinskörnung OF bei 520 mmol/l. Diese Werte werden, wenn ausreichend wirksame Alkalien im Beton vorliegen und oben aufgeführte, beschleunigte Reaktionen von Puzzolanen nicht auftreten, bereits im jungen Betonalter bis etwa 28d erreicht. Entsprechend sind, im Gegensatz zu bisherigen Annahmen in Bezug auf die Vermeidung einer AKR (kritischen Alkalikonzentration) die Verhältnisse bis zu diesem

Alter entscheidend ( $\leq 28d$ ). Schadensvermeidende Maßnahmen müssen daher, insofern sie auf die Reduzierung des wirksamen Alkaligehalts in der Porenlösung abzielen, in diesem Zeitraum wirksam werden.

Schließlich wurde deutlich, dass der Zeitraum zwischen Erreichen der kritischen Alkalikonzentration (Einsetzen einer schädigenden AKR in der Gesteinskörnung) und einer messbaren Betondehnung (Gefügeschädigung) mit ansteigender Lagerungstemperatur kleiner wird. Eine höhere Reaktionsrate und vor allem eine schnellere Wasseraufnahme (vgl. Abschnitt 4.5.2.4) sind wahrscheinlich die Ursache dafür. Gleichzeitig bildet diese Phase den Übergang von der in den Abschnitten zuvor abgehandelten Induktionsphase und der im Folgenden (Abschnitt 4.5) näher beleuchteten Schädigungsphase.

#### **4.4 Überlagerung von Feuchte- und Temperatureinfluss**

Auslaugung und Wasseraufnahme infolge Feuchtlagerung wirken sich ebenfalls direkt auf die Alkalikonzentration der Porenlösung aus (Abschnitt 4.2.5.1). Sie nehmen damit direkt Einfluss auf die Frage, ob und wann der kritische Alkaligehalt in der Porenlösung zur Auslösung einer schädigenden AKR erreicht wird. Dafür ist, wie aus den Untersuchungen zuvor hervorgeht, in erster Linie der Zeitraum bis etwa 28d maßgeblich, da bis zu diesem Zeitpunkt die Alkalifreisetzung aus dem Zement (inkl. weiterer Hauptbestandteile) und den Gesteinskörnungen weitestgehend beendet ist.

Zur Veranschaulichung der Auswirkung einer zusätzlichen Feuchtlagerung ist in Bild 4-31 die Alkalikonzentration der Porenlösung aus konserviert und frei bei unterschiedlichen Temperaturregimes gelagerten Betonproben einander gegenüber gestellt. Als Anhalt ist der Bereich der kritischen Alkalikonzentration für Gesteinskörnung OF grau hinterlegt. Da es sich hier um Analysen der Porenlösung eines Würfels mit 10 cm Kantenlänge handelt können nur tendenzielle Aussagen für Balken und Würfel mit größeren Abmessungen getroffen werden.

Bei Lagerung SAL übt die 6-tägige Feuchtlagerung zu Beginn den größten Einfluss aus. Durch die Verdünnung der Porenlösung infolge Wasseraufnahme und Auslaugung kann die Alkalikonzentration soweit abfallen, dass die kritische Konzentration, obwohl das Potential prinzipiell vorliegt, bis zum Alter von 28d nicht mehr erreicht wird. Balken mit hohem A/V-Verhältnis sind hier mehr gefährdet als kompakte Würfel. Langfristig kann die kritische Konzentration jedoch durch eine etwaige Austrocknung wieder erreicht werden.

Die Aussagen gelten prinzipiell auch für Lagerung NK40. Allerdings macht sich hier die Auslaugung auch langfristig bemerkbar. Das verhindert insbesondere bei Beton mit CEM I bzw. CEM II/A-S, dass die Alkalikonzentration ggf. zu

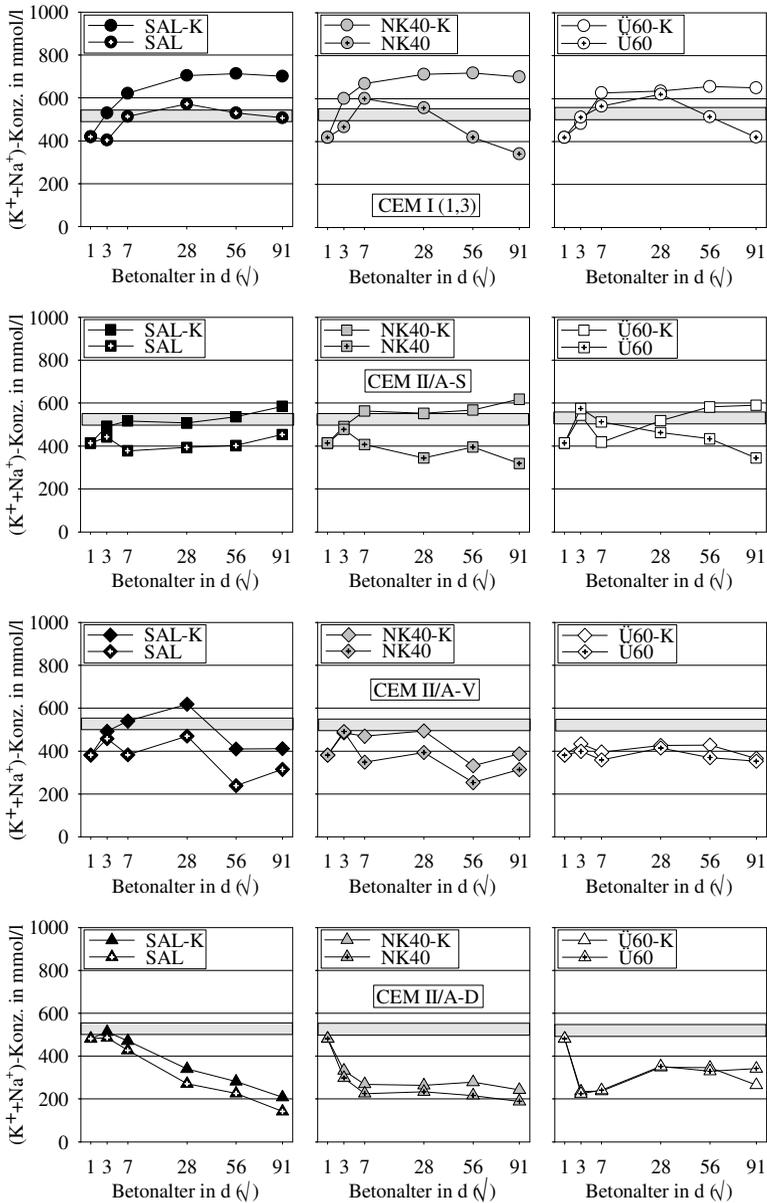


Bild 4-31: Zeitlicher Verlauf der Alkalikonzentration in der Porenlösung von konserviert (-K) und nicht konserviert gelagerten Betonproben mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$  und inertem Kalkstein der Sieblinie B/C16

einem späteren Zeitpunkt den kritischen Alkaligehalt erreicht (vgl. Lagerung SAL und CEM II/A-S).

Bei Lagerung Ü60 wirken sich die bis zum Alter von 28d relativ trockenen Lagerungsbedingungen positiv aus. Sie stellen sicher, dass die Alkalikonzentration der Porenlösung bis zu diesem Zeitpunkt nur minimal verfälscht wird. Das bedeutet, dass trotz einer grundsätzlich infolge der hohen Temperatur geringere Alkalikonzentration der Porenlösung diese Lagerung praxisnahe Verhältnisse unter beschleunigenden Bedingungen am besten wiedergibt. Beton mit puzzolanhaltigem Zement ist davon ausgenommen, weil durch die unverhältnismäßig starke Reaktion der Puzzolane bei dieser Lagerung die Alkalikonzentration deutlich unter dem kritischen Grenzwert gedrückt wird.

## **4.5 Schädigungsphase – Aufbau von Quelldrücken**

### *4.5.1 Modellvorstellung und Einflussparameter*

Ausgehend von der Voraussetzung, dass eine AKR im Beton stattgefunden hat und entsprechend ASH vorliegt, soll in diesem Abschnitt geklärt werden, ob auf Grund unterschiedlicher Lagerungsbedingungen einmal eine Gefügeschädigung auftreten kann und einmal nicht. Den zugehörigen Untersuchungen liegt folgende, in Anlehnung an die Ausführungen in [Kro 75, Viv 50] (Abschnitt 2.1.4.3) entwickelte Modellvorstellung zu Grunde. Ein osmotischer Druck, der sich schädigend auf den umgebenden Zementstein oder das Gesteinskorn auswirkt, entsteht dann, wenn das infolge Wasseraufnahme quellende ASH auf Grund einer zu hohen Viskosität nicht in der Lage ist, in die Porenräume des umgebenden Gefüges einzudringen (Bild 4-32).

Die Porosität der Gesteinskörnung ist vorgegeben und wird sich unter dem Einfluss der angewendeten Lagerungsbedingungen nicht verändern. Für die Mörtelmatrix im Beton haben die Ergebnisse in Abschnitt 4.3.3 gezeigt, dass gegenüber praxisnahen Bedingungen bei höheren Lagerungstemperaturen im frühen Betonalter eine Gefügeverdichtung auftritt. Bei erhöhten Lagerungstemperaturen sollte daher die Gefügeschädigung größer sein. Die im Abschnitt 2.4.5.2 dargestellten Ergebnisse weisen auf ein umgekehrtes Verhalten hin. Es konnte daher angenommen werden, dass die Porosität des umgebenden Gefüges nicht der entscheidende Parameter ist. Entsprechend wurde sie in diesem Abschnitt nicht weiter betrachtet.

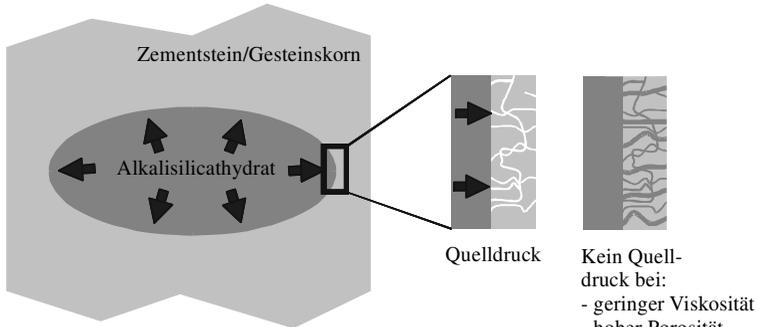


Bild 4-32: Modell zum Druckaufbau infolge quellender Alkalisilicate

Zur Viskosität des ASH zum Zeitpunkt der Erstschädigung liegen bisher keine Erkenntnisse vor. Die Ursachen sind vielfältig. ASH, das nach dem Auftreten von Schäden analysiert wird, stimmt nicht zwangsläufig mit dem überein, das den Schaden ausgelöst hat. Ferner werden i.d.R. nur geringe Mengen ASH gebildet, die vor allem auf Grund von Verunreinigungen mit weiteren Mineralen nur schwer zu gewinnen sind und darüber hinaus für eine Viskositätsbestimmung nicht ausreichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Erkenntnisse zur Viskosität industriell hergestellter Wassergläser zurückgegriffen (Abschnitt 2.1.5.2.). Zusammen mit den Ergebnissen zur Wasserauf- bzw. Volumenzunahme der sehr wasserarmen Stückenwassergläser werden sie dazu genutzt, die Ergebnisse der in den Abschnitten 3.3.1 bis 3.3.4 beschriebenen Mörtelprismen-tests, die die Interaktion (osmotischer Druck) zwischen Wasserglas als Modellschubstanz für ASH und einem porösen Medium abbilden, zu deuten und Rückschlüsse hinsichtlich der Übertragbarkeit von Laborprüfverfahren zu ziehen.

#### 4.5.2 Wasseraufnahme wasserfreier, gemahlener Alkalisilicate

##### 4.5.2.1 Voruntersuchung – Korngrößenverteilung

Um den Einfluss der zur Verfügung stehenden reaktiven Oberfläche bei den Untersuchungen zur Wasseraufnahme der gemahlene Stückenwassergläser ausschließen zu können, wurde in einem Vorversuch die Partikelgrößenverteilung der verwendeten Wassergläser bestimmt (Bild 4-33). Die Verteilungskurven sind für alle Wassergläser nahezu deckungsgleich, so dass Unterschiede bei der Wasseraufnahme infolge unterschiedlich großer Oberflächen ausgeschlossen werden können. Die deutlichen Differenzen im Bereich größer 200 µm sind wahrscheinlich auf einige nicht vollständig dispergierte Agglomerate zurückzuführen. Sie wirken sich hinsichtlich der Wasseraufnahme nicht weiter aus.

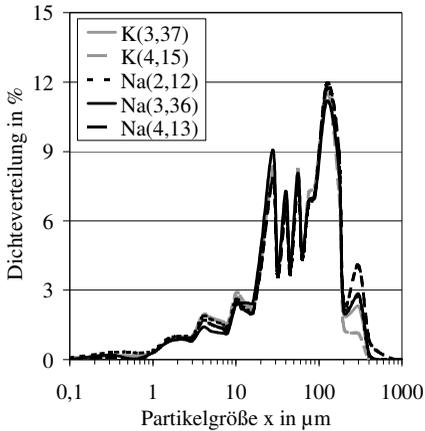


Bild 4-33: Partikelgrößenverteilung der in den Untersuchungen eingesetzten, gemahlene Stückenwassergläser

#### 4.5.2.2 Abhängigkeit vom Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$

Es kann vorausgesetzt werden, dass der Alkaligehalt in der Porenlösung sich unmittelbar auf die Zusammensetzung des ASH als Reaktionsprodukt einer AKR auswirkt. Höhere Alkaligehalte führen dabei zu geringeren Verhältnissen von  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ . Weiterhin ist bekannt, dass industriell hergestellte Wassergläser mit hohen Verhältnissen von  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  schneller trocknen und einen geringeren Restwassergehalt aufweisen [Cog 05]. Das Bestreben Wasser zu halten ist demnach bei hohen Alkaligehalten größer. Bei einer AKR liegt der umgekehrte Fall vor. Hier liegt zunächst sehr wasserarmes ASH vor, das bestrebt ist Wasser aufzunehmen. Bild 4-34 zeigt die festgestellten Abhängigkeiten für diesen Fall. Nach 28d bei 20 °C und 100% relativer Luftfeuchte hatten die gemahlene Stückenwassergläser mit höherem Alkaligehalt mehr Wasser aufgenommen. Außerdem wird deutlich, dass K-Wasserglas im Vergleich zu Na-Wasserglas gleichen Alkaligehalts (molar) zu einer deutlich größeren Wasseraufnahme geführt hat. Übertragen auf eine AKR bedeutet das, dass hohe K-Gehalte im ASH zu einer besonders schnellen und hohen Wasseraufnahme durch das Reaktionsprodukt führen können.

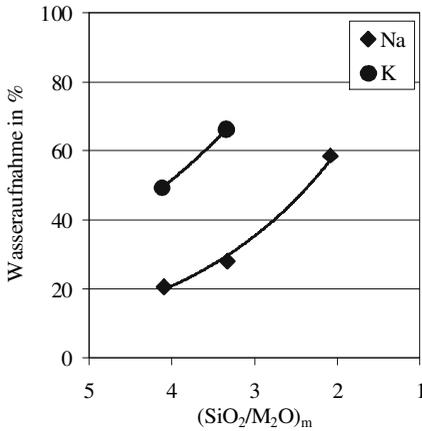


Bild 4-34: Wasseraufnahme der gemahlene Stückenwassergläser in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , r.F. = 100 %)

#### 4.5.2.3 Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte

Bild 4-35 zeigt die Wasseraufnahme der Stückenwassergläser nach 28d. Na-Wassergläser nahmen danach erst ab einer r.F. von 82 % signifikante Mengen Wasser auf, in deren Folge eine Volumenvergrößerung des ASH eintreten kann (Bild 4-35 links). Das alkalireichste Na-Wasserglas hatte nach 28d bereits deutliche Wassermengen aufgenommen, während die übrigen Na-Wassergläser bei dieser relativen Luftfeuchte eine langsame aber stetige Wasseraufnahme zeigten (Bild B-18). Die Beobachtungen decken sich mit den Ausführungen in Abschnitt 2.2.3.2 zum Einfluss der relativen Luftfeuchte auf eine AKR. Die dort beschriebenen Ergebnisse wurden in den USA gewonnen, wo die Zemente im Allgemeinen deutlich mehr Na als K enthalten.

Die K-Wassergläser zeigten bei 20 °C ein größeres Bestreben, Wasser aufzunehmen. Bereits bei 65 % r.F. wurde nach 28d eine deutliche Wasseraufnahme festgestellt (Bild 4-35, rechts). Die weitere Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte ist nahezu linear. In Abhängigkeit von der Zeit zeigte sich dagegen (Bild B-18), dass im Gegensatz zu den vergleichbaren Na-Wassergläsern der größte Teil des Wassers unabhängig von der relativen Luftfeuchte bereits bis zum Alter von 14d bis 21d aufgenommen wurde und im Weiteren die Aufnahme rate gegen Null tendierte. Diese Beobachtung entspricht Untersuchungen zum Einfluss der beiden Alkaliarten in [Dav 57, Ong 90]. Mörtel mit K-reichen Zementen oder in K-haltigen wässrigen Lösungen führten dabei schneller zu schädigenden Dehnungen als solche mit vergleichbarem Na-Anteil.

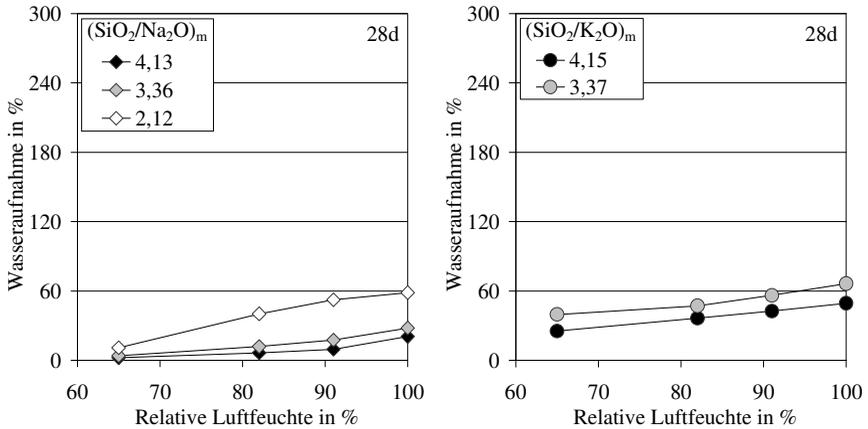


Bild 4-35: Wasseraufnahme der gemahlene Stückenwassergläser in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte ( $T = 20\text{ °C}$ ); links Na-Wasserglas, rechts K-Wasserglas

#### 4.5.2.4 Abhängigkeit von der Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf die Wasseraufnahme der gemahlene Stückenwassergläser ist in Bild 4-36 zusammengefasst. Die Ergebnisse weisen auf eine exponentielle Abhängigkeit der Wasseraufnahme von der Lagerungstemperatur hin. Hohe Alkaligehalte sowie Na gegenüber K führten zu den höchsten Steigerungsraten. Letzteres führte, wie anhand von Bild B-19 im Anhang zu erkennen ist, zu einer Angleichung der Wasseraufnahme von Na- und K-Wassergläsern bei höherer Lagerungstemperatur (Graustufe = molares Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ). Das ist ggf. ein Hinweis darauf, dass eine temperaturbedingte erhöhte Teilchenbewegung zunehmend die Wasseraufnahme des Stückenwasserglases bestimmt und die bei  $20\text{ °C}$  durch die verschiedenen Alkaliarten hervorgerufenen Unterschiede unterdrückt.

Die zuvor dargestellten Ergebnisse bedeuten gleichzeitig, dass bei höheren Temperaturen die Wasseraufnahme stark beschleunigt abläuft. Bild 4-37 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Der äquivalente Zeitraum, bis zu dem eine definierte Menge Wasser durch die Stückenwassergläser aufgenommen wurde, wurde dabei über der Lagerungstemperatur aufgetragen. Als Referenz wurde die Wasseraufnahme nach 56d bei  $20\text{ °C}$  gewählt. Bei  $40\text{ °C}$  wurde eine entsprechende Wasseraufnahme bereits nach 14d bis 21d erreicht. Bei  $60\text{ °C}$  war dafür nur noch ein Zeitraum von 5d bis 7d erforderlich. Das heißt, bei doppelt bzw. dreimal so hoher Temperatur wird 3- bis 4- bzw. 8- bis 10-mal so viel Wasser

im gleichen Zeitraum aufgenommen. Entsprechend schnell entwickelt sich der Druck des ASH auf den umgebenden Zementstein oder die Gesteinskörnung.

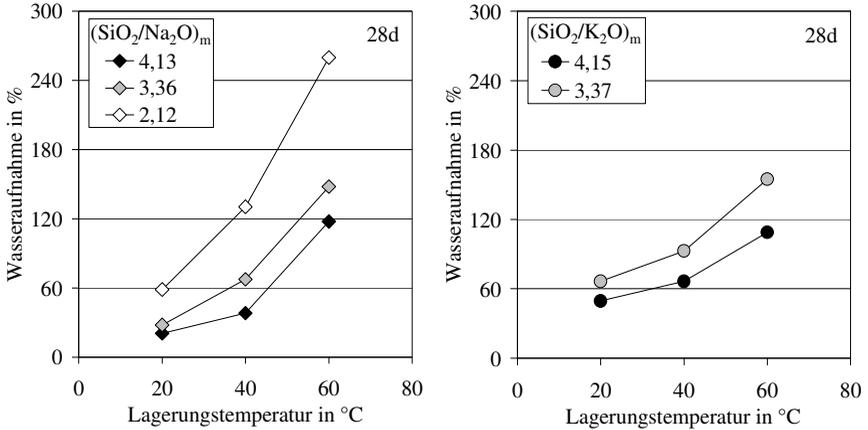


Bild 4-36: Wasseraufnahme der gemahlene Stückenwassergläser in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur (r.F. = 100 %)

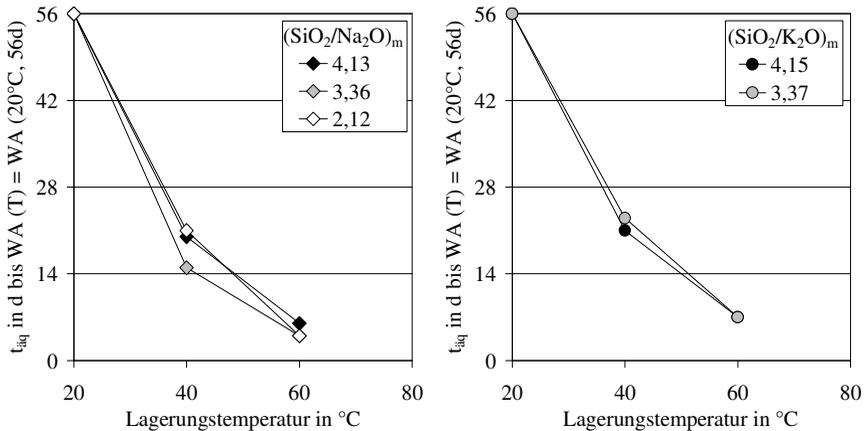


Bild 4-37: Äquivalente Zeit, bis zu der gleiche Mengen Wasser durch die gemahlene Stückenwassergläser aufgenommen wurden, in Abhängigkeit der Lagerungstemperatur (r.F. = 100 %)

## 4.5.3 Modellversuche zum Aufbau von Quelldrücken

### 4.5.3.1 Vorbemerkungen zur Auswertung

#### 4.5.3.1.1 Dehnung und augenscheinliche Beurteilung

In Bild 4-38 ist der typische Dehnungsverlauf eines mit gemahlenem Stückenwasserglas präparierten Mörtelprismas dargestellt. Er ist mit dem bekannten Dehnungsverlauf von Mörtel- bzw. Betonprismen bei den AKR-Prüfverfahren vergleichbar, der sich durch eine nach einer Induktionsperiode einsetzende und bei einem Endwert stagnierende Dehnung (Plateaubildung) kennzeichnet. Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die im Folgenden diskutierten Modellversuche dazu geeignet sind, die Zusammenhänge bei einer schädigenden AKR abzubilden.

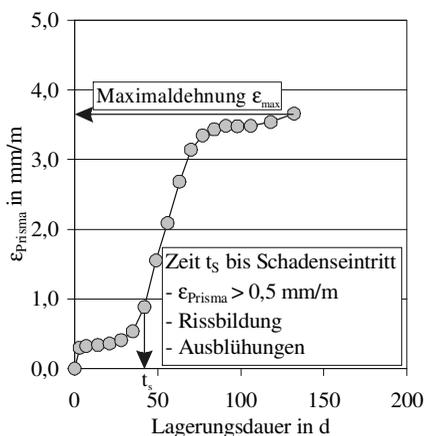


Bild 4-38: Typischer Dehnungsverlauf eines mit gemahlenem Stückenwasserglas präparierten Mörtelprismas

Zur weiteren Auswertung werden die erreichte Maximaldehnung  $\epsilon_{\text{max}}$  und die Rissweite  $w$  als Kriterium für das Schädigungspotential verwendet. Zur Beurteilung der Kinetik wird die Zeit  $t_s$  bis zum Schädigungseintritt herangezogen. Risse traten im Querschnitt der Bohrlöcher bei Dehnungen  $\epsilon > 0,5 \text{ mm/m}$  auf. Sie verliefen immer orthogonal zur Prismenachse vom Bohrloch weg über die Seitenfläche in Richtung Unterseite. Beide Ereignisse, das Auftreten eines Risses und das Erreichen einer Dehnung von  $0,5 \text{ mm/m}$ , werden daher als Schädenseintritt definiert. Darüber hinaus wurde festgehalten, wann am Mörtelprisma gelartige Ausscheidungen auftreten, die größer als ein Stecknadelkopf waren. Sie bedeuten zwar keine Gefügeschädigung, zeigen jedoch an, dass das Stückenwasserglas ausreichend gequollen ist, um oberflächlich sichtbar zu werden und damit potentiell zu Schäden zu führen.

Alle Beobachtungen sind im Anhang A in Tafel A-29 tabellarisch aufgeführt. Sie beziehen sich auf das Prüfende.

#### 4.5.3.1.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Nach Präparation der Proben (siehe Abschnitt 3.3.5.5) stellt sich im REM der Prismenquerschnitt wie in Bild 4-39 dargestellt dar. Ausgehend von der Mitte sollen daran die Veränderungen sowohl im Stückwasserglas (ASH) im Bohrloch als auch dessen mögliche Eindringung in die umgebende Mörtelmatrix in Richtung der dargestellten Pfeile beurteilt werden.

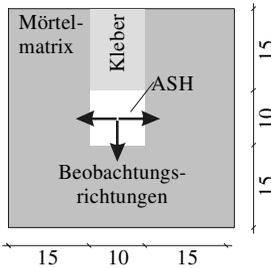


Bild 4-39: Prismenquerschnitt in Bohrlochachse und Beobachtungsrichtungen für rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Für letztgenannte Zielstellung sind nur Bohrlochbereiche geeignet, in denen während der Prüfungen noch keine Risse aufgetreten sind. Diese würden ein Eindringen des verflüssigten Stückwasserglases in die Mörtelmatrix vereinfachen und Rückschlüsse auf Grund unterschiedlicher Rissweiten und damit Fließwiderstände verfälschen. Da in den meisten Fällen die Rissebene gleich der Spaltebene war, reduzierte sich durch diese Bedingung die Anzahl der im Hinblick auf die Eindringtiefe auswertbaren Prismen erheblich.

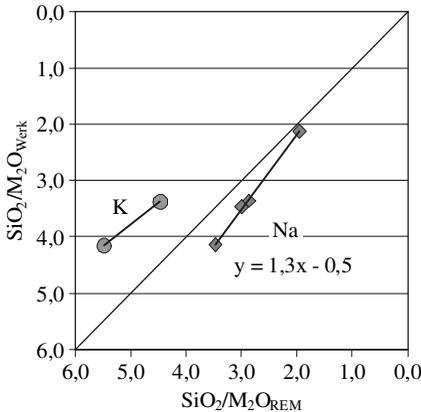


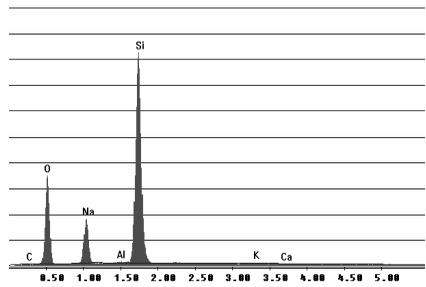
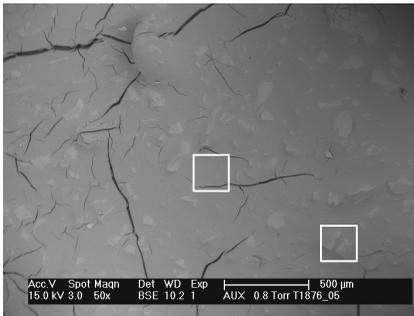
Bild 4-40: Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  im Vergleich zwischen Werksangabe und Bestimmung mit dem REM

Der Alkaligehalt in dem Stückwasserglas ist im Vergleich zu üblichen Proben zementgebundener Baustoffe sehr hoch. Deshalb war die Eignung des REM zur Bestimmung der Zusammensetzung der Stückwassergläser bzw. der Reaktionsprodukte zu überprüfen. Dazu wurde das an den Stückwassergläsern bestimmte Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  den Werksangaben gegenübergestellt. Aus dem in Bild 4-40 gezeigten Vergleich geht hervor, dass für K-haltige Wassergläser

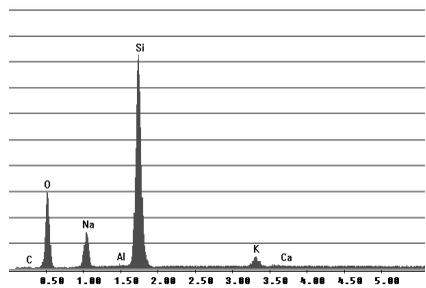
zu hohe Werte ermittelt wurden. Für die Na-haltigen Wassergläser wurden ab einem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  von 2 zu geringe Verhältnisse bestimmt. Insgesamt können somit in der weiteren Auswertung nur Tendenzen hinsichtlich der Zusammensetzung der Wassergläser und ihrer Veränderung angegeben werden.

#### 4.5.3.2 Verhalten der Stückenwassergläser

In diesem Abschnitt wird zunächst auf das prinzipielle Verhalten im Hinblick auf die Interaktion zwischen Mörtel und gemahlenem Stückenwasserglas eingegangen. Um die Verhältnisse am Anfang bzw. vor einer Schädigung zu klären, wurde ein Prisma ausgewählt, das nach Abschluss der Untersuchungen keine Gefügeschäden aufwies und an dem darüber hinaus keine Ausscheidungen beobachtet wurden ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 4,13$ ; Lagerung NK20).



a)



b)

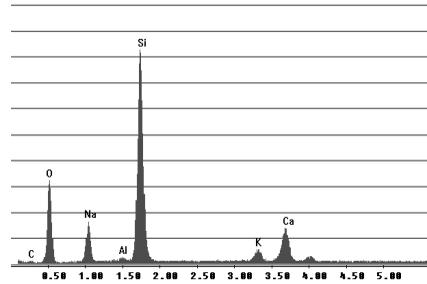
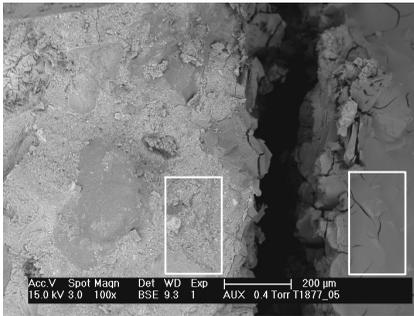
Bild 4-41: REM-Aufnahme des Wasserglases mit  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 4,13$  (im Bohrloch eines Mörtelprismas, Lagerung NK20) sowie zugehörige EDX-Spektren

- a) Glasbruchstück (rechts im Bild)
- b) isotrope Grundmasse (links im Bild)

Bild 4-41 zeigt die Mitte eines mit dem Stückenwasserglas gefüllten Bohrlochs in diesem Prisma. Es ist eine z.T. mit Schwindrissen durchsetzte isotrope Grundmasse zu erkennen, in der sich scharfkantig abgegrenzte Partikel abzeichnen. Die EDX-Analysen zeigen, dass diese nur Na und Si enthielten. Das ist ein

Hinweis darauf, dass es sich bei den Partikeln um das vorgegebene gemahlene Stückenwasserglas handelte, dessen Einzelpartikel wie Glasbruchstücke aussahen. Demgegenüber enthielt die isotrope Grundmasse in Spuren auch K. Es ist wahrscheinlich, dass dies aus der Porenlösung des Mörtelprismas stammt, da es mit kaliumhaltigem Zement hergestellt wurde.

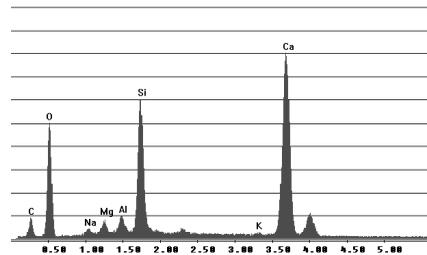
Bild 4-42 zeigt den Randbereich des gleichen Bohrlochs. Aus den EDX-Analysen geht hervor, dass Ca Bestandteil des vormals im Kontakt mit dem Zementstein stehenden verflüssigten Wasserglases war. Gleichzeitig reduzierte sich der Na-Anteil im Vergleich zur Zusammensetzung in Bohrlochmitte.



a)

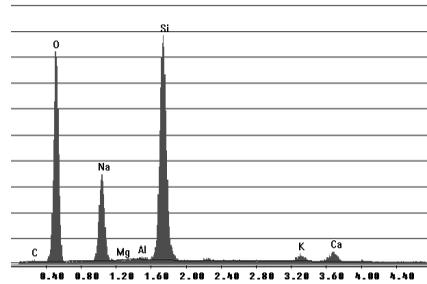
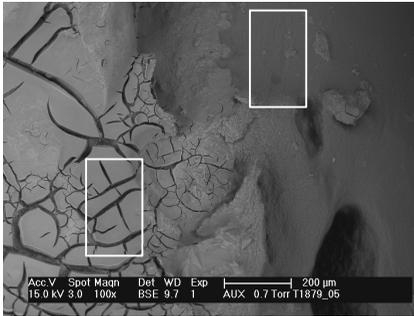
Bild 4-42: REM-Aufnahme vom Übergangsbereich Mörtelmatrix – Wasserglas mit  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 4,13$ , Lagerung NK20, sowie zugehörige EDX-Spektren

- a) Wasserglas (im Bild rechts)
- b) Mörtelmatrix (im Bild links)

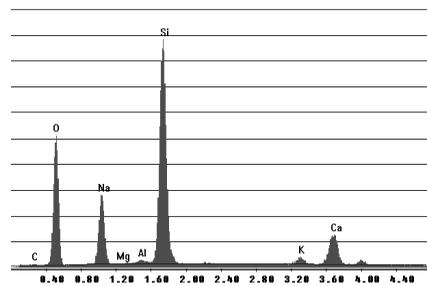


b)

Zur Überprüfung der Verhältnisse bei einem Wasserglas mit geringerer spezifischer Viskosität wurde der Bohrlochquerschnitt des vergleichbar gelagerten Prismas mit einem Verhältnis von  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,12$  betrachtet. Bild 4-43 zeigt den Randbereich zur Mörtelmatrix. Es deutet sich an, dass hier durch eine Wasseraufnahme das Wasserglas derart verflüssigt wurde, dass der Großteil davon in die Mörtelmatrix abfließen konnte. Nur die Bohrlochwandung war noch mit relativ wasserreichem Wasserglas (hoher Sauerstoffpeak) überzogen, welches bereits geringe Anteile an Ca enthielt. Wasserglas im direkten Kontakt mit der Mörtelmatrix (infolge Schwinden durch Teilvakuum gerissen) enthielt wiederum mehr Ca. Erneut fiel gleichzeitig der Anteil an Na ab.



a)



b)

Bild 4-43: REM-Aufnahme vom Übergangsbereich Mörtelmatrix – Wasserglas mit  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,12$ , Lagerung NK20, sowie zugehörige EDX-Spektren

- a) ungerissener Wasserglasüberzug
- b) gerissener Wasserglasüberzug

Die Beobachtungen lassen folgende Schlussfolgerungen zu: Auf Grund des Bestrebens des trockenen Stückenwasserglases Wasser aufzunehmen, dringt kaliumhaltige Porenlösung aus dem umgebenden Zementstein in das gemahlene Stückenwasserglas ein und löst dieses. Die Einzelbruchstücke werden dadurch viskoser und verbinden sich in Abhängigkeit vom Alkaligehalt des ursprünglichen Wasserglases bis zum Prüfende mehr oder weniger vollständig zu einer isotropen Masse. Im Randbereich zur Mörtelmatrix wird Na zu einem geringen Teil durch Ca aus der umgebenden Mörtelmatrix im Wasserglas substituiert. Dies führt wahrscheinlich zu einer solchen Immobilisierung des veränderten Wasserglases, dass ein Ausfließen des im Randbereich entstehenden Reaktionsprodukts nicht mehr möglich ist und es als Überzug an der Bohrlochwandung verbleibt.

#### 4.5.3.3 Einfluss der Feuchtebedingungen

Die Maximaldehnung der bei vier verschiedenen Feuchtebedingungen gelagerten Prismen ist im linken Teil von Bild 4-44 zusammengestellt. Es zeichnete sich ab, dass mit zunehmendem Feuchteangebot größere Maximaldehnungen

auftreten. Dies galt insbesondere für die Prismen mit alkalireichem Stückenwasserglas und dem entsprechend stärkeren Bestreben Wasser aufzunehmen. Bei geringerem Alkalianteil war Streubreite größer, jedoch traten tendenziell höhere Maximaldehnungen als bei den alkalireichen Wassergläsern auf.

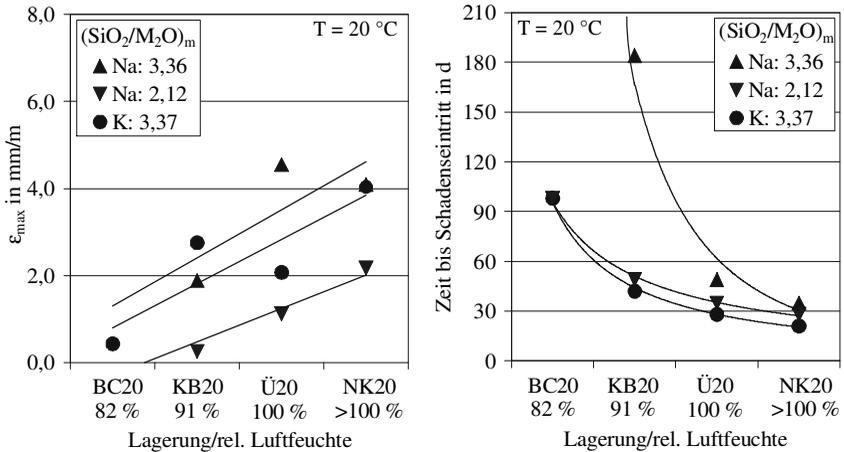


Bild 4-44: Maximale Dehnung (links) und Schadenseintritt (rechts) an Mörtelprismen in Abhängigkeit von der Lagerung/relativen Luftfeuchte bei Verwendung unterschiedlich zusammengesetzter Wassergläser

Die Ausbildung von Rissen sowie die zugehörigen Rissweiten verhielten sich analog, mehr und größere Risse bei größerer relativer Luftfeuchte (Bilder B-20 und B-21 sowie Tafel A-29). Jedoch ließen sich die Risse bei hohem Wasserangebot mit zunehmender Prüfdauer weniger gut identifizieren, da sie i.d.R. durch großflächig auftretende Ausscheidungen überdeckt wurden (Lagerungen Ü20 und NK20). Bei Lagerung KB20 und BC20 traten dagegen vornehmlich klar abgegrenzte Ausscheidungen auf. Darüber hinaus unterschied sich das Aussehen der Stückenwassergläser im Bohrloch nach Prüfende. Mit sinkendem Feuchteangebot wies das Stückenwasserglas eine zunehmend trübe bis milchig-weiße Färbung auf. Das ist ein Hinweis darauf, dass die Umwandlung vom pulverförmigen in den homogenen Zustand bei geringeren Luftfeuchten langsamer abläuft. Zudem waren die Bohrlöcher bei hohem Feuchteangebot zum Teil entleert (Bilder B-22 und B-23).

Nicht nur das Schadensbild sondern auch das zeitliche Eintreten der Schädigung war, wie Bild 4-44 rechts zeigt, vom Feuchteangebot in der Luft abhängig. Die Schädigung trat umso schneller ein, je größer die Feuchte der Luft war. Ferner traten die Schäden bei Lagerung NK20 etwa zu gleichen Zeitpunkten auf, während bei kleinerem Feuchteangebot eine gewisse Abstufung in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Stückenwassergläser zu verzeichnen war.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei variierendem Feuchteangebot ( $T = 20\text{ °C}$ ) der Einfluss der Wasser- bzw. Volumenzunahme des Wasserglases (Bild 4-35) dominierend im Hinblick auf die Schädigung der Prismen ist. Die aus Bild 2-9 hervorgehende stark fallende Viskosität bei höherem Wassergehalt (geringerem Feststoffgehalt) wird offenbar nicht wirksam. Das lässt sich ggf. darauf zurückführen, dass bei zunehmender Wasseraufnahme das vormalig trockene Stückenwasserglas zunächst einen sehr steifen Viskositätsbereich durchläuft. Ein Eindringen des Wasserglases in die Porenräume des umgebenden Mörtels ist in diesem Zustand unwahrscheinlich, so dass der sich parallel aufbauende Fülldruck voll wirksam werden kann. Dieser Vorgang läuft umso schneller ab, je größer das Wasserangebot und je höher das Bestreben des Wasserglases ist, Wasser aufzunehmen (hoher Alkaligehalt).

Im Hinblick auf AKR-Prüfverfahren zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass Prüfartefakte auf Grund einer feuchten Lagerung unwahrscheinlich sind. Die Reihenfolge und die Differenz bezüglich des Schädigungsgrads sind in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Wassergläser bei hohem wie niedrigem Wasserangebot in der Luft vergleichbar. Darüber hinaus ist vorteilhaft, dass bei hohem Wasserangebot in der Luft schneller gleichwertige Ergebnisse erzielt werden (Bild 4-44 rechts).

#### *4.5.3.4 Einfluss der Lagerungstemperatur*

In Bild 4-45 links ist zu erkennen, dass in Abhängigkeit von der Temperatur die maximale Dehnung der Mörtelprismen bei Lagerung über Wasser annähernd linear abgenommen hat und zunehmend unabhängig von der Zusammensetzung des Stückenwasserglases war. Gleichzeitig nahmen die Anzahl und die Größe der Gelausscheidungen auf der Prismenoberfläche zu. Eine vergleichbare Tendenz wie zuvor war auch hinsichtlich des Zeitpunkts der Schädigung festzustellen (Bild 4-45 rechts). Während es bei  $60\text{ °C}$  unabhängig von der Zusammensetzung des gemahlten Stückenwasserglases nahezu gleichzeitig und sehr schnell zu einer Schädigung kam, war bei  $20\text{ °C}$  bei generell späterem Schadenseintritt eine gewisse Differenzierung festzustellen. Die silicatreichen Gläser führten langsamer zu einer Schädigung als die alkalireichen.

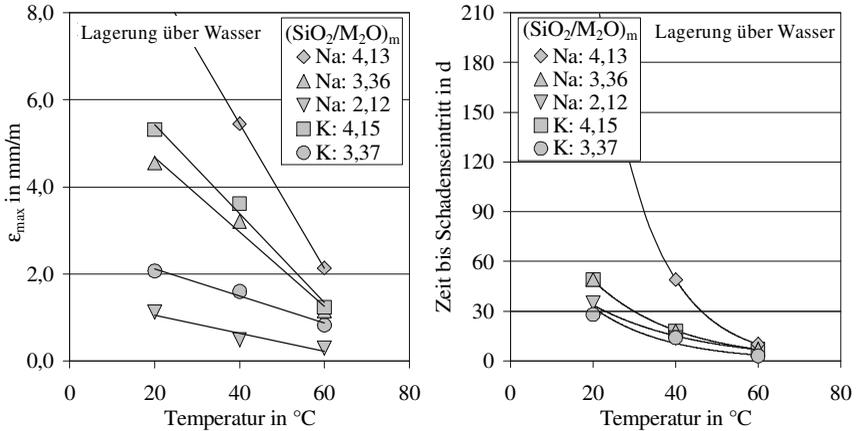


Bild 4-45: Maximale Dehnung (links) und Schadenseintritt (rechts) an Mörtelprismen in Abhängigkeit von der Temperatur bei Verwendung unterschiedlich zusammengesetzter Wassergläser

Die Viskosität von Wasserglas weist vergleichbare Abhängigkeiten von der Temperatur auf (Abschnitt 2.1.5.2, Bild 2-10 links). Daher ist anzunehmen, dass die mit ansteigender Temperatur stetig abnehmende Viskosität und damit die Fähigkeit des Wasserglases, sich zu verformen und in das poröse Medium einzudringen, bestimmt, ob ein gefügeschädigender Fülldruck aufgebaut wird. Der Füllgrad der Bohrlöcher nach Prüfende unterstützt diese Vermutung. Bei geringer Lagerungstemperatur war mehr Restmenge an Wasserglas festzustellen (Bild B-24). Auch Untersuchungen im REM an zwei Prismenproben, die in der Nebelkammer gelagert wurden und Stückenwasserglas mit einem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,12$  enthielten, deuten in diese Richtung (Bild 4-46). Bei höherer Lagerungstemperatur von 40 °C und folglich geringerer Viskosität drang das Wasserglas tiefer in die Mörtelmatrix ein als bei 20 °C.

Für Laborprüfverfahren bedeuten die dargestellten Zusammenhänge, dass infolge einer geringeren Viskosität des Reaktionsprodukts einer AKR der Schädigungsgrad kleiner ist als unter Normalbedingungen. Es besteht bei erhöhten Lagerungstemperaturen zunehmend die Gefahr, eine schädigende AKR zu unterschätzen. Darüber hinaus lassen sich Abhängigkeiten zwischen Gefügeschädigung und Zusammensetzung der Reaktionsprodukte, z.B. zur Klärung der Wechselwirkungen bei einer Alkalizufuhr von außen, weniger gut feststellen. Ursache ist ein mit ansteigender Temperatur abfallender Einfluss der Zusammensetzung des Reaktionsprodukts einer AKR auf die Schädigung.

- NK20;  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 4,13$
- - - NK20;  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,12$
- ..... NK40;  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,12$

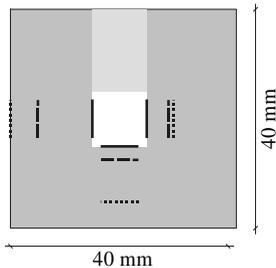


Bild 4-46: Eindringtiefe der verflüssigten Stückenwassergläser in die Mörtelmatrix (Prismenquerschnitt in Bohrlochachse)

#### 4.5.3.5 Einfluss des Alkaligehalts im Stückenwasserglas

Der Einfluss des Alkaligehalts im Stückenwasserglas auf die Maximaldehnung als Indikator für eine potentielle Gefügeschädigung ist getrennt nach Na- und K-Wasserglas im linken Teil von Bild 4-47 zu sehen. Mit ansteigendem Alkaligehalt und entsprechend abfallendem molaren Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  nahm die Maximaldehnung ab. Darüber hinaus war bei K der Abfall der Maximaldehnung mit steigendem Anteil im Stückenwasserglas stärker als bei Na.

Analog zu Abschnitt 4.5.3.4 deuten die Darstellungen zu den Eigenschaften (Bild 2-9, rechts, nur Verhältnisse  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O} > 2$  sind relevant) und zur Wasseraufnahme von gemahlenem Stückenwasserglas (Bild 4-34) ebenfalls darauf hin, dass der Schädigungsgrad der Mörtelprismen durch die Viskosität des infolge Wasseraufnahme verflüssigten Stückenwasserglasses bestimmt wird. Folgende weitere Beobachtungen bekräftigen dies:

- mit abfallendem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  zahlreichere und größere Ausscheidungen, die z.T. ohne Rissbildung auftreten (Tafel A-29, Bild B-25),
- teilweise entleerte Bohrlöcher bei Verwendung des Na-Stückenwasserglasses mit dem höchsten Alkaligehalt und
- eine mittels REM-Untersuchungen festgestellte größere Eindringtiefe von verflüssigtem Stückenwasserglas bei höherem Alkaligehalt in Prismen gelagert in der 20 °C-Nebelkammer (Bild 4-46).

Obwohl die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme durch das Stückenwasserglas den Ergebnissen des Abschnitts 4.5.2.2 zufolge deutlich vom Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  abhängig ist, zeigte sich hinsichtlich des Schadenseintritts keine ausgeprägte Abhängigkeit. Lediglich bei niedriger Lagerungstemperatur verzög-

gert sich der Schadenseintritt geringfügig mit fallendem Alkaligehalt. Ggf. wirkt hier die Mörtelmatrix als Puffer gegen eine adäquate Feuchtezufuhr, weil ein Teil des verfügbaren Wassers zunächst durch den trockenen Zementstein gebunden wird und so das charakteristische Verhalten der Wassergläser nicht sichtbar wird.

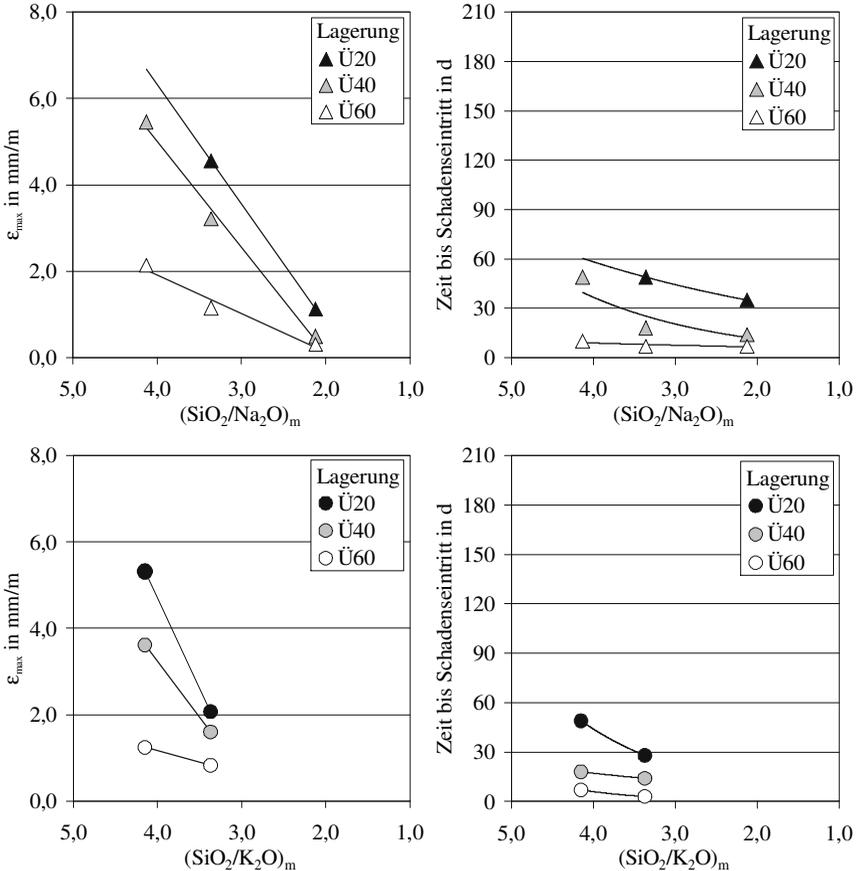


Bild 4-47: Maximale Dehnung (links) und Schadenseintritt (rechts) an Mörtelprismen in Abhängigkeit vom molaren Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  (Na oben, K unten) bei Lagerung über Wasser und unterschiedlichen Temperaturen

Zur Beschleunigung einer AKR werden in verschiedenen Prüfverfahren der Alkaligehalt des Zements aufdotiert oder die Probekörper in alkalihydroxidreichen Lösungen gelagert. Dies kann dazu führen, dass infolge einer geringeren Viskosität des Reaktionsprodukts keine Risse oder Dehnungen während der Prüfung auftreten, obwohl unter baupraktischen Bedingungen ein signifikantes

Schädigungspotential vorhanden wäre. Große und zahlreiche Ausblühungen bei ausbleibender Dehnung sind ggf. ein Hinweis auf solche Fälle.

#### 4.5.3.6 Einfluss frei verfügbaren Calciumhydroxids

Gemäß den bereits dargestellten Untersuchungen ist die Anwesenheit von CH nicht erforderlich, um Gefügeschäden hervorzurufen. Auf Grund der Ausführungen in Abschnitt 2.1.4.3 und Untersuchungen in [Bly 98, Tho 98] ist jedoch ein positiver Einfluss nicht auszuschließen. Um die Interaktion zwischen ASH als Reaktionsprodukt einer AKR und dem CH nachzuvollziehen und die Auswirkungen zu verstehen, wurde in einige Mörtelprismen ein Gemisch aus CH und gemahlenem Stückenwasserglas in die Bohrlöcher eingefüllt. Die Prismen wiederum wurden verschiedenen klimatischen Bedingungen unterworfen.

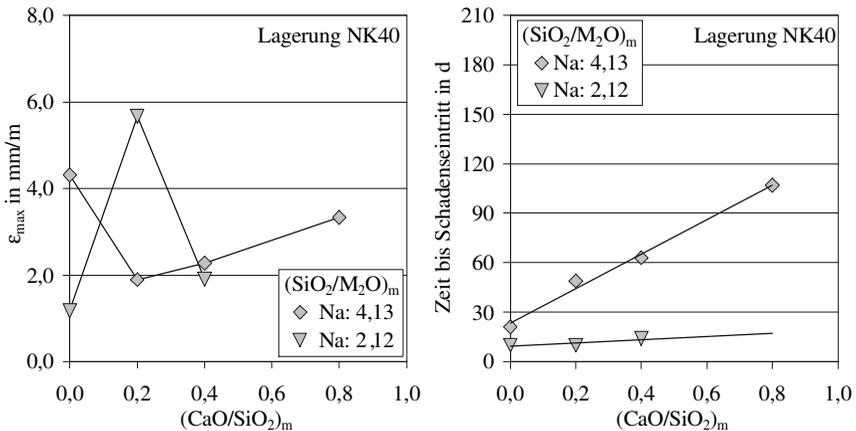


Bild 4-48: Maximale Dehnung (links) und Schadenseintritt (rechts) an Mörtelprismen in Abhängigkeit vom molaren Verhältnis  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  bei Lagerung NK40 und unterschiedlichem molarem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$

Im linken Teil von Bild 4-48 ist dargestellt, wie sich bei Lagerung NK40 die Maximaldehnung in Abhängigkeit vom vorgegebenen Verhältnis  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  verhalten hat. Bei Verwendung von Na-Stückenwasserglas mit niedrigem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  von 2,12 und entsprechend geringer spezifischer Viskosität bildete sich beim Verhältnis  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,2$  ein spitzes Maximum aus. An der Stabilitätsgrenze zum CSH ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,8$ ) wurden weder eine Gefügeschädigung noch Ausscheidungen festgestellt. Bei Verwendung des viskosereren Na-Stückenwasserglases ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 4,13$ ) trat der umgekehrte Fall ein. Jedoch fiel der Anstieg nach dem Minimum bei  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,2$  moderater aus als der anfängliche Abfall. Ferner wird anhand des rechten Teils in Bild 4-48 deutlich, dass die Zeit bis zum Schadenseintritt in Abhängigkeit vom Verhältnis

CaO/SiO<sub>2</sub> bei geringem Verhältnis SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O annähernd konstant war, während sie bei höherem Verhältnis linear anstieg.

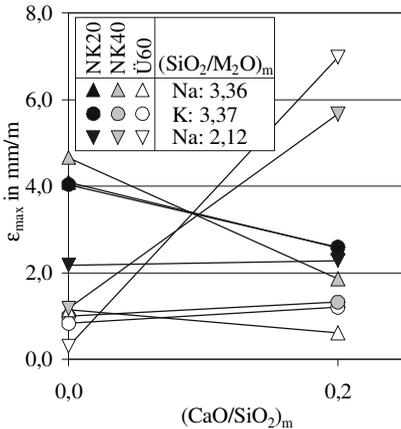


Bild 4-49: Vergleich der maximalen Dehnung von Mörtelprismen mit und ohne Zugabe von CH zu gemahltem Stückenwasserglas (CaO/SiO<sub>2</sub> = 0,20) bei unterschiedlichen Lagerungen

In Bild 4-49 ist die Maximaldehnung von Mörtelprismen verglichen, die bei jeweils gleicher Lagerung und gleichem gemahltem Stückenwasserglas einmal ein Verhältnis CaO/SiO<sub>2</sub> von 0,00 und einmal von 0,20 aufwiesen. Auf den ersten Blick ergibt sich ein unklares Bild. Zieht man jedoch in Betracht, dass unter den jeweiligen Bedingungen mit zunehmender Temperatur und abfallendem Verhältnis SiO<sub>2</sub>/M<sub>2</sub>O die Viskosität des Wasserglases kleiner wird, lässt sich Folgendes ableiten: Bei Wassergläsern hoher Ausgangsviskosität (geringe Temperatur, großes Verhältnis SiO<sub>2</sub>/M<sub>2</sub>O), die gegenüber anderen Wassergläsern entsprechend große Gefügeschäden hervorgerufen haben, führte die Anwesenheit von CH zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes. Für mittlere Viskositäten ließ sich kaum ein Einfluss der Anwesenheit von CH feststellen – der Schädigungsgrad blieb weitgehend konstant. Bei geringen Viskositäten (hohe Temperatur, kleines Verhältnis SiO<sub>2</sub>/M<sub>2</sub>O) dagegen stieg die Gefügeschädigung sehr stark an. Besonders deutlich wird das in Bild 4-50 anhand der gegenüber dem Vergleichsversuch sehr starken Rissbildung bei Zugabe von CH (CaO/SiO<sub>2</sub> = 0,20).

Untersuchungen einiger Proben im REM im Anschluss an die Dehnungsmessungen zeigten, dass sich mit zunehmendem CH- bzw. CaO-Anteil im vorgegebenen Gemisch ein zunehmend dichteres und formstabiles Gefüge ausgebildet hatte (Bild 4-51). Darüber hinaus konnte anhand von Punktanalysen festgestellt werden, dass umso mehr Ca in den Reaktionsprodukten enthalten war, je weniger sie als gelartig beschrieben werden konnten und je mehr Struktur sie aufwiesen.

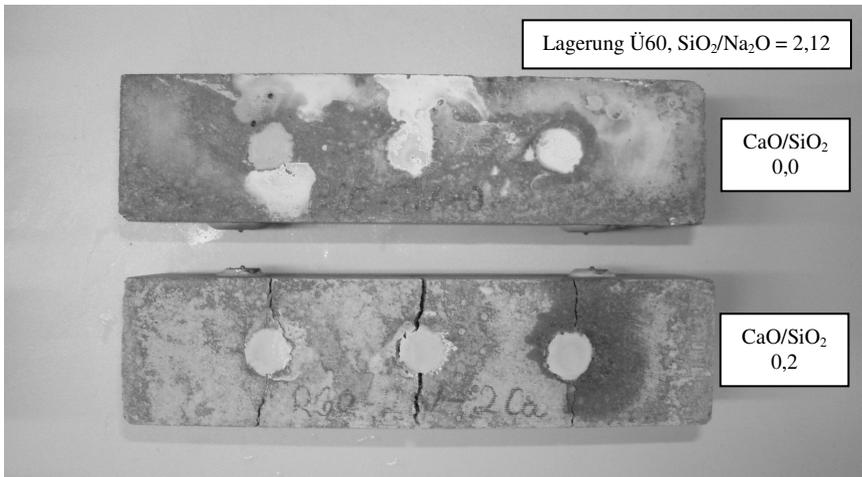


Bild 4-50: Mörtelprismen gefüllt mit einem Na-Stückenwasserglas bzw. einem Gemisch aus diesem und CH nach Beendigung der Prüfung bei Lagerung Ü60

Die Ergebnisse deuten an, dass das CH mit dem Stückenwasserglas reagiert und seine Eigenschaften verändert. Dazu müssen das  $\text{Ca}^{2+}$ -Ion und die  $\text{OH}^-$  Ionen in die Struktur des Wasserglases (ASH) eindringen. Aufgrund seiner hohen Bindungskapazität bildet das  $\text{Ca}^{2+}$ -Ion schnell Verbindungen aus – dabei agiert es im Gegensatz zu den Alkalien Na und K als Netzwerkbildner [Sch 04]. Letztere werden dabei wahrscheinlich, ebenso wie das Wasserstoffatom vorliegender Silanolgruppen, durch das  $\text{Ca}^{2+}$ -Ion substituiert (siehe Gl. 4-6) [Wan 91]. Die Wahrscheinlichkeit, dass Alkalien substituiert werden, steigt dabei mit kleiner werdendem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  im Wasserglas an.

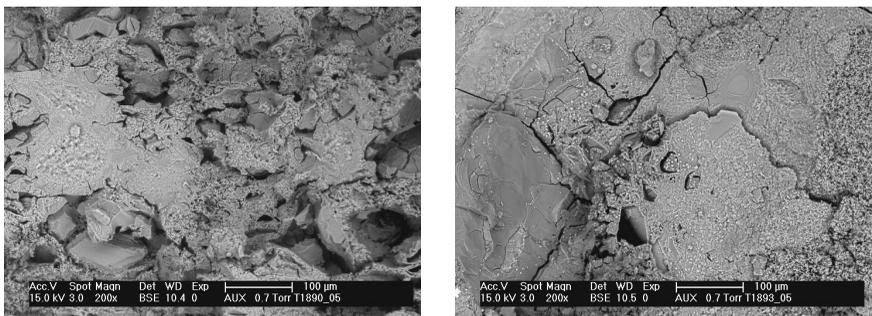
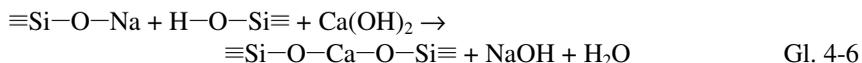


Bild 4-51: Gefüge im Bohrloch nach Beendigung der Lagerung NK40 nach rd. 180d,  
links:  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,12$ ;  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,4$   
rechts:  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,12$ ;  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,8$



Die dargestellte Vernetzung einzelner Moleküle oder Molekülgruppen innerhalb des Wasserglases führt dazu, dass zum einen die Gesamtstruktur weniger verformbar ist. Sie gewinnt an Viskosität. Zum anderen ist durch den festgelegten Abstand ein Quellen zunehmend erschwert. Die Behinderung ist umso größer, je mehr Ca in der Struktur enthalten ist. Die freigesetzten Alkalihydroxide können die vorhandene Kieselsäurestruktur erneut angreifen und das Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  an anderer Stelle verringern. Das Bestreben Wasser aufzunehmen wird dadurch lokal erhöht. Gleichzeitig fällt jedoch die Viskosität ab, so dass die weitere schädigende Wirkung nur schwer beurteilt werden kann. Die Beobachtungen zuvor deuten jedoch auf folgende Tendenzen hin:

1. Bei hohen Temperaturen und hohem Alkaligehalt im ASH führt eine mäßige Verfügbarkeit an CH vornehmlich zu einer Erhöhung der Viskosität ohne die Volumenvergrößerung signifikant zu unterbinden. Das Potential für eine Gefügeschädigung wird dadurch erheblich erhöht.
2. Ausgehend von steifen Reaktionsprodukten und bei hoher Verfügbarkeit von CH entsteht ein dichtes, nicht quellfähiges Gefüge, das das Potential für Gefügeschäden stark abmindert.

Eine Ausnahme bildete der Versuch mit einem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 4,13$  in Bild 4-50, bei dem mit steigendem CaO-Anteil die maximale Dehnung nach einem Minimum wieder anstieg. Ein Erklärungsansatz für dieses Phänomen ist, dass hier  $\text{Ca}^{2+}$  nur oberflächlich auf den Stückenwasserglaspartikeln reagiert und diesen Bereich verfestigt, weil es auf Grund einer sehr kompakten Glasstruktur bei geringem Alkaligehalt nicht weiter in dieses eindringen kann. Das ursprüngliche Schädigungspotential des Stückenwasserglases bleibt jedoch im Kern erhalten und wirkt sich zeitversetzt aus.

Im Beton steht CH insbesondere in der Kontaktzone in größerer Menge zur Verfügung. Deswegen ist anzunehmen, dass eine Einbindung von Ca in ASH nur im Randbereich eines Gesteinskorns auftritt und der bereits vielfach dokumentierte dichtere Reaktionssaum auf diese Reaktion zurückzuführen ist (z.B. in [Cha 05, Spr 98]). Dieser Saum kann das Ausfließen des ggf. weiter im Innern der Gesteinskörnung gebildeten ASH stärker behindern als der umgebende Zementstein (poröse Kontaktzone), so dass ein Ausfließen des ASH erst bei geringeren Viskositäten erfolgt. Bei gleichzeitig fortschreitender Volumenzunahme kann es dann zu größeren Fülldrücken und Gefügeschäden kommen.

Im Hinblick auf AKR-Prüfverfahren ist wahrscheinlich, dass die dargestellten Wechselwirkungen sich vor allem bei Gesteinskörnungen auswirken, die reaktive Kieselsäure über das gesamte Korn verteilt enthalten oder dieses sich am

Rand befindet (z.B. Opalsandstein und Flint). Liegen die reaktiven Bestandteile dagegen im Innern der Einzelkörner vor, ist eine signifikante Beeinflussung des Schadensausmaßes durch CH unwahrscheinlich. Außerdem ist ein Einfluss bei der Untersuchung von Portlandkompositzementen in Kombination mit Opalsandstein und Flint denkbar. Der CH-Anteil in der Kontaktzone wird hier infolge der Füllerwirkung reduziert [Larb 93]. Zusätzlich vermindert er sich in Abhängigkeit des Reaktionsfortschritts vor allem der Puzzolane. Erhöhte Lagerungstemperaturen beschleunigen diesen Prozess (Abschnitt 0). Die Ausbildung einer dichten Barriere aus ACSH, die das Auslaufen des ASHs verhindert, ist somit weniger wahrscheinlich. Das bei erhöhter Lagerungstemperatur zudem niedrigviskosere ASH kann dann wesentlich früher in den umgebenden Zementstein abfließen als unter praxisnahen Bedingungen. Ein unterschiedliches Verhalten zwischen Laborprüfung bei erhöhter Lagerungstemperatur und realen Umgebungsbedingungen wird dadurch zunehmend wahrscheinlich.

#### 4.5.4 Zusammenfassung

Im Abschnitt 4.5 wurde untersucht, welche Auswirkungen die Laborbedingungen bei den Betonprüfungen auf den Aufbau von Quelldrücken und damit eine Gefügeschädigung haben. Den Versuchen wurde ein Modell zu Grunde gelegt, nach dem ein ausreichender osmotischer Druck dann auftritt, wenn das infolge Wasseraufnahme quellende ASH nicht in der Lage ist, sich im Porenraum des umgebenden porösen Mediums zu verteilen. Die Porosität des umgebenden Mediums sowie das Verhalten und die Eigenschaften des bei einer AKR gebildeten ASH sind demnach die maßgeblichen Kriterien für eine mögliche Gefügeschädigung. Die Porosität konnte jedoch auf Grund vorliegender Ergebnisse als Ursache für die beobachtete Diskrepanz zwischen Laborprüfung und Außenlager ausgeschlossen werden. Die durchgeführten Untersuchungen zu den Eigenschaften und dem Verhalten von ASH, eingebettet in einem porösen Medium (Mörtelprisma), reichten somit aus, um Aufschluss über die definierte Fragestellung geben zu können.

Als Modellschubstanz zur Simulation von ASH wurde gemahlener Stückenwasserglas (Na und K) verwendet, das industriell auch über ein AKR hergestellt werden kann. Die aus der Literatur bekannten Eigenschaften und die Untersuchung der Wasseraufnahme der unterschiedlichen, gemahlener Stückenwassergläser führten zu folgenden Erkenntnissen.

- Die Viskosität von Wasserglas/ASH fällt mit steigender Temperatur und größer werdendem Alkali- sowie Wasseranteil zunehmend ab. Die Auswirkung der Temperatur ist bei feststoffreichen Reaktionsprodukten einer AKR ausgeprägter als bei wasserreichen.

- Die Wasseraufnahme von Stückenwasserglas/ASH wird hauptsächlich durch dessen Alkalianteil und die vorherrschende Temperatur beeinflusst (je höher, desto schneller und umfangreicher). Mit steigender relativer Luftfeuchte nimmt die Wasseraufnahme nur mäßig zu.
- K-haltiges Wasserglas/ASH nimmt anfangs schneller und mehr Wasser auf als Na-haltiges. Bei vergleichbaren Alkalianteilen kommt es bei erhöhten Temperaturen zu einer Angleichung zwischen den Alkaliarten.
- Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme nimmt insbesondere mit ansteigender Temperatur stark zu.

Die Zusammenhänge wurden zur Auswertung der Modellversuche verwendet, bei denen Mörtelprismen mit unterschiedlich zusammengesetzten Wassergläsern unter verschiedenen Umgebungsbedingungen gelagert wurden. Die Maximaldehnung, Rissbildung und Ausscheidungen, die Zeit bis zur Erstschädigung sowie REM-Analysen wurden als Kriterien verwendet. In Bezug auf die bei Laborprüfverfahren an Beton eingesetzten Methoden zur Beschleunigung einer AKR sowie die Übertragbarkeit der dabei erzielten Ergebnisse/Aussagen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden.

#### Umgebungsfeuchte

Eine erhöhte Umgebungsfeuchte beschleunigt den Schädigungsprozess und führt in gleichen Zeiträumen zu höheren Schädigungsgraden. Dabei kommt es nicht zu Verschiebungen zwischen dem Verhalten von Prismen mit verschieden zusammengesetzten Wassergläsern/ASHen. Daher kann angenommen werden, dass eine erhöhte Lagerungsfeuchte während der Schädigungsphase einer AKR eine geeignete Maßnahme ist, den notwendigen Prüfzeitraum zu verkürzen und ohne dass die Gefahr besteht, eine AKR zu unterschätzen.

#### Lagerungstemperatur

Bei Reaktionsprodukten einer AKR gleicher Zusammensetzung (ASH) führt eine gegenüber der Praxis erhöhte Lagerungstemperatur zu einer Verringerung des Schädigungsgrads. Sie kann auf den zunehmenden Einfluss der mit höherer Temperatur abnehmenden Viskosität des Wasserglases/ASHs zurückgeführt werden, die ein Eindringen desselben in das umgebende Gefüge ohne Druckaufbau ermöglicht. Bei erhöhten Lagerungstemperaturen besteht daher die Gefahr, eine unter praktischen Bedingungen schädigende AKR zu unterschätzen. Darüber hinaus wurde deutlich, dass sich die in Abhängigkeit der Zusammensetzung der/s Wassergläser/ASHe einstellenden unterschiedlichen Schädigungsgrade unter praxisnahen Bedingungen bei erhöhten Lagerungstemperaturen zunehmend angleichen. Differenzen im möglichen Schädigungsgrad infolge einer AKR, z.B. zwischen Betonen mit verschiedenen Zementen, lassen sich somit schlechter feststellen.

### Alkaligehalt

Höhere Alkaligehalte im ASH führen auf Grund einer geringeren Viskosität zu kleineren Schädigungsgraden (erleichtertes Eindringen in die Mörtelmatrix). Die in Laborprüfungen eingesetzte Maßnahme, den Alkaligehalt der Porenlösung und somit des Reaktionsprodukts ASH durch Lagerung der Probekörper in starken Alkalilaugen oder die Verwendung von sehr alkalischen Zementen (z.T. durch Aufdotierung) zu erhöhen, kann somit zu einer Unterschätzung der tatsächlich möglichen Schädigung infolge einer AKR führen, insofern keine weiteren Phänomene (z.B. Auslaugung) diesen Einfluss wieder ausgleichen.

Aus den Beobachtungen lässt sich darüber hinaus ableiten, dass reines Wasserglas/ASH in der Lage ist, Gefügeschäden hervorzurufen. CH ist dafür nicht erforderlich. Wie die abschließenden Untersuchungen zum Einfluss von frei verfügbarem CH gezeigt haben, kann es jedoch verstärkend auf die Gefügeschädigung wirken. Dies gilt insbesondere für Gesteinskörnungen, in denen ASH während einer AKR am Rand der Gesteinskörnung gebildet wird. In einem schmalen Randbereich substituieren  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen Alkalien und Hydroxylionen im ASH. Das führt zu einem steiferen ASH mit geringerem Quellvermögen und dichter Struktur. Diese hindert weiter im Innern des Gesteinskorns gebildetes ggf. ausreichend flüssiges ASH daran, in die Zementsteinmatrix einzudringen. Der osmotische Druck kann durch zusätzliche Aufnahme von Wasser weiter aufgebaut werden und es kommt zu Gefügeschäden, wenn die Zugfestigkeit der umgebenden Matrix überschritten wird. Wird der CH-Anteil in der Kontaktzone, z.B. durch den Einsatz von Puzzolanen, vermindert, nimmt dieser Effekt ab und die Gefügeschädigung wird dann zunehmend über die Interaktion zwischen Viskosität und Volumenzunahme des ASH bestimmt. Dabei nimmt die Sensitivität gegenüber Temperatureinflüssen auf den Schädigungsgrad zu.

#### *4.5.5 Modellbildung zur Beschreibung des Schädigungsgrads*

Die Untersuchungen in Abschnitt 4.5 deuten darauf hin, dass neben der Volumenzunahme  $\Delta V$  des ASH infolge Wasseraufnahme, die üblicherweise als Erklärungsansatz für unterschiedliche Schädigungsgrade angesetzt wird, gleichzeitig auch die Viskosität  $\eta$  des ASH entscheidenden Einfluss nimmt. Die prinzipielle Wechselwirkung zwischen Volumenzunahme und Viskosität in Bezug auf den Schädigungsgrad ist schematisch bereits in Bild 4-32 dargestellt (Abschnitt 4.5.1). Jedoch fehlt bislang ein Beschreibungsansatz. Dieser soll im Folgenden auf Basis der vorliegenden Ergebnisse abgeleitet werden.

Als allgemein anerkannt kann zunächst angenommen werden, dass eine Betonschädigung infolge AKR mit zunehmender Wasseraufnahme und damit Volumenzunahme  $\Delta V$  des ASH größer wird. Der Literatur zu den Eigenschaften

künstlicher Wassergläser ist zu entnehmen (Abschnitt 2.1.5.2), dass sich deren wesentlichste Eigenschaft, die dynamische Viskosität  $\eta$ , in Abhängigkeit vom Feststoff- bzw. Wasseranteil im Wasserglas verändert. Die Viskosität nimmt dabei mit steigendem Wasseranteil stark ab. Übertragen auf eine schädigende AKR nach dem Modell in Bild 4-32 bedeutet dies, dass mit zunehmender Wasseraufnahme die Viskosität des ASH und damit der Schädigungsgrad abnehmen.

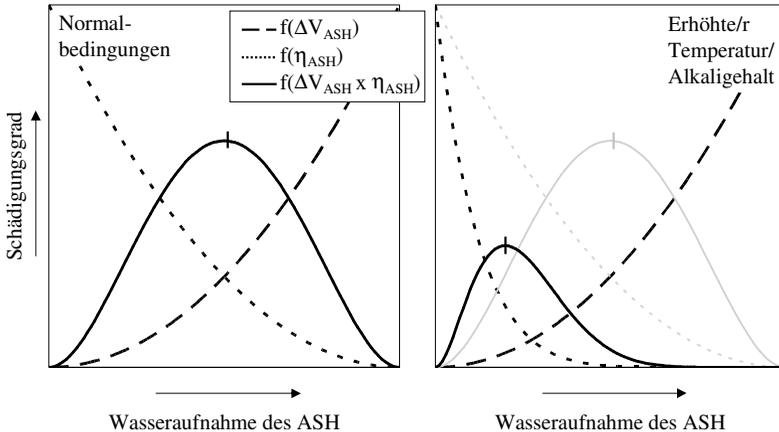


Bild 4-52: Beschreibung des Schädigungsgrads eines porösen Gefüges infolge Wasseraufnahme durch ASH sowie die Beschreibung des Schädigungsgrade resultierend aus den zu Grunde liegenden Einzelphänomenen Volumenvergrößerung und Viskositätsabnahme  
 links: Situation unter Normalbedingungen  
 rechts: Verschiebungen bei erhöhter Temperatur bzw. erhöhtem Alkaligehalt im ASH

Eine Wasseraufnahme durch das Wasserglas respektive ASH führt damit einerseits zu einem ansteigenden ( $\rightarrow \Delta V_{ASH}$ ) und andererseits zu einem abfallenden ( $\rightarrow \eta_{ASH}$ ) Schädigungsgrad. Diese beiden Zusammenhänge sind in Bild 4-52 links schematisch veranschaulicht. Volumen und Viskosität des Wasserglases sind voneinander unabhängige Größen. Der durch beide Größen gemeinsam bedingte Schädigungsgrad lässt sich daher durch das Produkt der aus den Einzelmechanismen resultierenden Schädigungsgrade ausdrücken. Er ist ebenfalls in Bild 4-52 links dargestellt. Es wird deutlich, dass der Schädigungsgrad in Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch das ASH bis zu einem Maximum ansteigt und anschließend wieder abfällt. Dabei ist wesentlich, dass der Schädigungsgrad zunächst durch die ansteigende Volumenzunahme und erst darauf durch die abfallende Viskosität bestimmt wird. D.h., eine bestimmte Volumenzunahme  $\Delta V$  muss möglich sein, bevor die abfallende Viskosität  $\eta$  in Bezug auf eine Gefügeschädigung überhaupt wirksam werden kann. Übertragen auf eine AKR in Gesteinskörnungen bedeutet das, dass der Einfluss einer abfallenden

Viskosität bei einer porösen alkaliempfindlichen Gesteinskörnung wie Opalsandstein eher auftritt als bei einer dichten Gesteinskörnung.

Gemäß Abschnitt 4.5.2 wird die Wasseraufnahme bei erhöhter Temperatur und erhöhtem Alkaligehalt im ASH/Wasserglas beschleunigt. Das bedeutet lediglich, dass gleich große Quelldrücke im Vergleich zu Normalbedingungen schneller auftreten. Die Volumenzunahme  $\Delta V$  sowie der Abfall der Viskosität, die einer bestimmten Wasseraufnahme zugeordnet werden können, ändern sich dadurch nicht. Eine Veränderung im Vergleich zu Bild 4-52 links ist deshalb auf Grund der beschleunigten Wasseraufnahme nicht zu erwarten. Darüber hinaus wird die Viskosität von Wasserglas/ASH bei erhöhter Temperatur und kleinerem Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  geringer (Abschnitt 2.1.5.2). Dies ist in Bild 4-52 rechts berücksichtigt. Wie erwartet verschiebt sich dadurch der aus Volumenzunahme und Viskositätsabfall resultierende Schädigungsgrad. Folgenden Veränderungen gegenüber den Normalbedingungen im linken Bildteil treten auf:

1. Der maximale Schädigungsgrad wird kleiner.
2. Der Bereich der Wasseraufnahme, in dem der Schädigungsgrad durch die abfallende Viskosität des ASH bestimmt wird (rechts des Maximums), wird größer. Der Einfluss der Viskosität tritt eher auf.

Während der Mörtelprimentests wurde eine abnehmende Maximaldehnung (=Schädigungsgrad) sowohl mit ansteigender Lagerungstemperatur als auch mit kleineren Verhältnissen  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  festgestellt. Das war der Fall, obwohl die erreichten Maximaldehnungen in Richtung ansteigendem Bestreben des ASH, Wasser aufzunehmen und das Volumen zu vergrößern (Abschnitte 4.5.2.2 und 4.5.2.4), auf der Abszisse aufgetragen wurden. Dies lässt sich, ebenso wie geringere Maximaldehnungen während einiger Laborprüfungen (Abschnitt 2.2.3.1), nur mit einem dominierenden Einfluss der abfallenden Viskosität erklären.

Diese Übereinstimmung der Beobachtungen bei den Mörtelprimentests mit den Aussagen des Modells, das auf Basis des spezifischen Verhaltens der Wassergläser abgeleitet wurde, ist eine erste Bestätigung für eben dieses. Allerdings wurde bisher in keiner der bisherigen Darstellungen zu den Mörtelprimentests ein Maximum, d.h. der Übergang vom durch die Volumenvergrößerung bestimmten zum viskositätsbestimmten Verhalten, festgestellt. Vom Modellansatz erscheint dieser Fall sehr wahrscheinlich, wenn die Volumenzunahme forciert wird und gleichzeitig eine abnehmende Viskosität schnell an Einfluss gewinnt. Nach den bisherigen Ausführungen sind dafür zum einen eine hohe Feuchte (Lagerung NK) und zum anderen eine erhöhte Temperatur förderlich. Werden diese Größen fixiert, bleibt als variable Größe das Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  (ansteigende Wasseraufnahme bei abfallendem Molverhältnis).

Je Alkaliart lagen nur 2 (K) bzw. 3 (Na) Mörtelprismenversuche unter den genannten Lagerungsbedingungen vor. Mit diesen ließ sich getrennt nach Alkaliart der komplexe Verlauf der Schadensintensität nicht abbilden. Daher wurde anhand des bisher gezeigten Verhaltens versucht, unabhängig von der Alkaliart in den Stückenwassergläsern eine systematische Reihenfolge zu finden, die es ggf. erlaubt, die Versuche aller Wassergläser nebeneinander darzustellen. Mit geringen Abweichungen trat i.d.R. folgende Reihenfolge in den Versuchen auf:

Na (4,13)  $\Rightarrow$  K (4,15)  $\Rightarrow$  Na (3,36)  $\Rightarrow$  K (3,37)  $\Rightarrow$  Na (2,12)

Besonders deutlich ist dies anhand der Ergebnisse in Abschnitt 4.5.3.3 zum Einfluss der Temperatur zu erkennen (Bild 4-45). Insgesamt erschien es gerechtfertigt, die Maximaldehnung bei Lagerung NK und konstanter Temperatur in Abhängigkeit der dargestellten Reihenfolge darzustellen. Das Ergebnis ist in Bild 4-53 zu sehen.

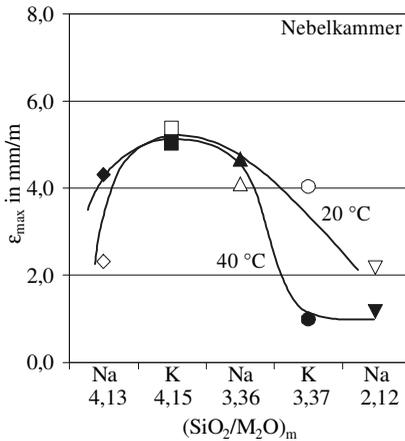


Bild 4-53: Maximaldehnung in Abhängigkeit vom molaren Verhältnis  $SiO_2/M_2O$  mit von links nach rechts abfallender spezifischer Viskosität bei Lagerung in einer Nebelkammer

Es zeigt, dass sowohl bei 20 °C als auch bei 40 °C ein Maximum auftritt. Für die Wassergläser links des Maximums mit einem Verhältnis  $SiO_2/M_2O$  um die 4 dominiert der Einfluss der Volumenzunahme bei Wasseraufnahme den Schädigungsgrad. Bei kleineren Verhältnissen dagegen fällt die Viskosität rasch ab (kleinere molekulare Einheiten), so dass der Schädigungsgrad geringer wird. Dies geschieht anscheinend umso schneller, je höher die Temperatur ist. Die verflüssigende Wirkung eines höheren Wassergehalts (höhere Wasseraufnahme bei kleinem Verhältnis  $SiO_2/M_2O$ ) und einer höheren Temperatur überlagern sich in diesem Fall. Insgesamt können damit die aus dem spezifischen Verhalten von Wassergläsern abgeleiteten Wechselwirkungen in Bild 4-52 sowie das Modell für das schädigende Verhalten von ASH in porösen Medien als bestätigt angesehen werden.

Das Auftreten eines Pessimums bedeutet, dass bei einem bestimmten Anteil an alkaliempfindlicher Kieselsäure ein maximaler Schädigungsgrad im Beton oder Mörtel auftritt (Abschnitt 2.2.1.2). Das entspricht prinzipiell der Darstellung in Bild 4-53. Es ist daher anzunehmen, dass die Ausbildung eines Pessimums ebenfalls auf die Wechselwirkungen zwischen umgebendem porösen Gefüge und Volumenzunahme bzw. Viskosität des ASH als Reaktionsprodukt einer AKR zurückzuführen ist.

## **5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Zemente mit latent-hydraulischen und puzzolanischen Bestandteilen können sich positiv im Hinblick auf die Vermeidung einer gefügeschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) auswirken. Zum Nachweis ihrer Wirksamkeit wurden/werden vermehrt Prüfverfahren eingesetzt, die ursprünglich zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung entwickelt wurden. Anhand von vergleichenden Betonprüfungen wurde diesbezüglich beobachtet, dass unter Prüfbedingungen im Labor eine bei praxisnaher Lagerung auftretende schädigende AKR ggf. nicht erkannt und damit das Risiko falsch eingeschätzt wird.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, die Phänomene und Wechselwirkungen im Beton zu erarbeiten, die während der Prüfung im Labor im Hinblick auf eine schädigende AKR ablaufen und zu dem beschriebenen diskrepanten Betonverhalten führen können. Die Erkenntnisse können im Weiteren in Empfehlungen für Prüfvorschriften einfließen, die die Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen auf die Praxis erhöhen.

Den Untersuchungen zur Induktionsphase einer schädigenden AKR wurden die Bedingungen in der 40 °C-Nebelkammer (NK40) gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3, bei 60 °C über Wasser (Ü60) gemäß NF P 18454 und einer simulierten Außenlagerung (SAL) in Anlehnung an das im FIZ seit langem durchgeführte Procedere zur Prüfung von Beton im Außenlager zu Grunde gelegt. Es wurde einerseits an Betonen verschiedener Zusammensetzung und mit unterschiedlichen Zementen der Einfluss der Feuchtebelastung auf die Alkalität der Porenlösung im Beton untersucht. Andererseits wurde der Einfluss der Lagerungstemperatur auf die zeitliche Relation einer AKR zur Reaktion weiterer Hauptbestandteile im Zement überprüft. In Verbindung damit wurden die Auswirkungen auf die Alkalität der Porenlösung und die Gefügeeigenschaften des Betons (CH-Anteil, Porosität) ermittelt. Im Hinblick auf die Schädigungsphase (Aufbau eines Quelldrucks) wurde zunächst das spezifische Verhalten des Reaktionsprodukts einer AKR charakterisiert. Im Weiteren wurde mit Stückenwassergläsern als Modellsubstanz für das Reaktionsprodukt einer AKR dessen Verhalten in und die Auswirkungen auf eine Mörtelmatrix untersucht. Dabei wurden ver-

schiedene an die zuvor genannten Prüfverfahren angelehnte klimatische Bedingungen einbezogen.

Die Ergebnisse sowie ihre Bedeutung für die Praxis sind im Folgenden zusammengestellt.

## **5.1 Ablauf einer schädigenden AKR**

### *5.1.1 Erkenntnisse*

Die im Verlauf dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse beschränken sich nicht ausschließlich auf die Überprüfung einer AKR im Labormaßstab sowie die Übertragbarkeit der daraus resultierenden Ergebnisse auf die Praxis. Es wurden darüber hinaus allgemeine Erkenntnisse zum Ablauf und den bestimmenden Größen einer schädigenden AKR gewonnen.

#### Induktionsphase (Auslösung einer AKR)

- Entgegen der bisherigen Annahme zeichnet sich ab, dass eine AKR mit langsam reagierenden Gesteinskörnungen auch unter praktischen Bedingungen bereits im jungen Betonalter einsetzen kann (Bild 4-22 und Bild 4-23).
- Die Bedingung für den Beginn einer AKR ist, dass eine kritische, von der Lagerungstemperatur unabhängige Alkalikonzentration in der Porenlösung des Betons erreicht wird. Sie scheint für jede alkaliempfindliche Gesteinskörnung spezifisch zu sein. Für die in dieser Arbeit berücksichtigte langsam reagierende Gesteinskörnung SKH und die schnell reagierende, poröse Gesteinskörnung OF beträgt die kritische Konzentration etwa 600 mmol/l bzw. 520 mmol/l.
- Neben dem Zementklinker, der i.d.R. den Hauptteil der wirksamen Alkalien beiträgt, können auch weitere Hauptbestandteile im Zement (S, V, D) Alkalien freisetzen. Dies tritt vor allem in sehr jungem Betonalter auf, wenn der Alkalibeitrag durch den Portlandzementklinker noch gering ist (Bilder B-11 bis B-13). Die Alkalikonzentration der Porenlösung und damit die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer AKR werden dadurch erhöht.
- Glimmer und Feldspäte in alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen können ebenfalls einen Beitrag zum wirksamen Alkaligehalt in der Porenlösung leisten (siehe auch [Ber 04]). Die Gesteinskörnung OF setzt sehr schnell und unabhängig von der Temperatur Alkalien frei (Bild 4-22) und beschleunigt so den Eintritt einer AKR. Für die Gesteinskör-

nung SKH wurde ein Alkalibeitrag nur bei einer Lagerungstemperatur von 60 °C beobachtet (Bild 4-23).

### Schädigungsphase

- Wasserglas/ASH allein kann das Gefüge eines Mörtels/Betons infolge eines osmotischen Drucks schädigen.
- Der resultierende Schädigungsgrad hängt dabei nicht nur von der Volumenzunahme  $\Delta V$  des Reaktionsprodukts (ASH) infolge Wasseraufnahme ab. Er wird darüber hinaus maßgeblich durch die sich einstellende Viskosität  $\eta_{\text{ASH}}$  beeinflusst (Bild 4-52). Mit ansteigender Wasseraufnahme bestimmt bis zu einem Maximum zunächst das zunehmende Volumen des ASH den Schädigungsgrad. Danach fällt dieser ab, weil das ASH infolge einer zunehmend geringeren Viskosität vermehrt in die umgebende Matrix eindringen kann (vgl. Bild 4-32).
- Die Lage des Schädigungsmaximums ist keine konstante Größe. Sie ändert sich vor allem in Abhängigkeit vom Verhältnis  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  im ASH und mit der Lagerungstemperatur. Veränderungen dieser Parameter gegenüber der Praxis, wie z.B. durch Lagerung von Probekörpern in starken Laugen und/oder bei erhöhten Temperaturen, beeinflussen daher den Schädigungsgrad dahingehend, dass er zunehmend durch eine abnehmende Viskosität bestimmt wird. Ein Einfluss der Alkaliart ist ebenfalls wahrscheinlich, da bei gleichen Anteilen K bzw. Na im ASH unterschiedliche Viskositäten beobachtet werden.
- Da der Einfluss der Volumenzunahme dem der dynamischen Viskosität vorgelagert ist, kann letztere nur dann wirksam werden, wenn ein gewisser Verdrängungsraum zur Verfügung steht, der die Volumenzunahme ohne Gefügeschädigung ermöglicht. Das diesbezügliche Verhalten poröser und dichter alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen ist daher verschieden.
- Frei verfügbares  $\text{Ca}^{2+}$  ist für eine Gefügeschädigung infolge einer AKR nicht erforderlich, jedoch kann es den Schädigungsgrad entscheidend beeinflussen (siehe f)).
- Prinzipiell wirken sich  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen durch die Substitution von Alkalien und Hydroxidionen im ASH [Wan 91] strukturbildend und viskositätssteigernd aus. Sie sind vor allem am Rand (Kontaktzone) alkaliempfindlicher Bereiche eines Gesteinskorns verfügbar, so dass sich dort aus zuvor gebildetem ASH eine dichte, höchst viskose Schicht aus ACSH ausbildet. Diese agiert, wie vielfach beschrieben, als semipermeable Membran [Ido 97, Pow 55, Spr 98, StaJ 01] und hindert im Innern des Gesteinskorns gebildetes niedrigviskoserer ASH daran, in die umge-

bende Mörtelmatrix einzudringen. Die schadensmindernde Wirkung einer abfallenden Viskosität wird somit bis zu einem bestimmten Grad außer Kraft gesetzt (vgl. Bild 4-52 links). Der osmotische Druck und damit die Gefügeschädigung können deutlich größer ausfallen als ohne eine solche Membran.

## 5.1.2 *Schlussfolgerungen für die Praxis*

### 5.1.2.1 *Vermeidung einer schädigenden AKR*

Bei der Vermeidung einer schädigenden AKR geht es in der Regel darum, die Voraussetzungen für eine AKR so zu kontrollieren, dass sie nicht eintritt bzw. das Reaktionsprodukt (ASH) nicht gefügeschädigend wirkt. Die zuvor aufgeführten Erkenntnisse zur Induktionsphase zeigen diesbezüglich neue Grenzen und Vorgehensweisen auf.

Der Grund für das frühe Eintreten einer AKR auch bei langsam reagierenden Gesteinskörnungen ist, dass die maximale Alkalikonzentration in der Porenlösung in der Regel nach 28d erreicht ist. Im Weiteren steigt sie nur noch geringfügig infolge eines reduzierten freien Wassergehalts an (fortschreitende Hydratation) an. Soll das Erreichen der kritischen Alkalikonzentration einer bestimmten alkaliempfindlichen Gesteinskörnung unterbunden werden, müssen entsprechende Maßnahmen vor diesem Zeitpunkt greifen. Da Flugaschen unter normalen Bedingungen erst nach 28d beginnen zu reagieren, sollte eine Alkalibindung durch ihre Reaktionsprodukte in dieser Hinsicht nicht berücksichtigt werden. Die in der Praxis beobachtete positive Wirkung [Tho 06] ist deshalb eher auf die Verdünnung der Porenlösung (geringere Wasserbindung und Alkalifreisetzung (V)) und langfristig auf eine Gefügeverdichtung zurückzuführen. Letztere unterbindet den für den Aufbau eines Quelldrucks erforderlichen Nachschub an Wasser. Gleiches gilt für Hüttensand als weiteren Hauptbestandteil im Zement. Dagegen kann bei Silikastaub und ggf. auch bei Metakaolin infolge ihrer schnelleren Reaktion eine Alkalibindung durch die Reaktionsprodukte berücksichtigt werden, wenn eine langsam reagierende Gesteinskörnung zum Einsatz kommt. Wird dagegen eine sehr schnell reagierende poröse Gesteinskörnung, wie norddeutscher Kies mit Opalsandstein und Flint, verwendet, sollte diese Wirkung ebenfalls vernachlässigt werden.

### 5.1.2.2 *Entwicklung von NA-Zementen*

Um die zuvor geschilderten Randbedingungen bei der Entwicklung von Zementen mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA-Zement) zu berücksichtigen, kann wie folgt vorgegangen werden:

Vom kritischen Alkaligehalt einer bestimmten Gesteinskörnung werden mögliche Alkalibeträge durch die Gesteinskörnung sowie etwaige Zusatzmittel abgezogen. Diese Differenz bestimmt – abzüglich eines noch zu bestimmenden Vorhaltemaßes – die maximal im Zementstein erlaubte Alkalikonzentration. Ob diese überschritten wird, kann bei konstantem w/z-Wert mittels Porenlösungsanalysen an Zementstein oder Beton mit inertem Kalkstein als Gesteinskörnung ermittelt werden. Die Anpassung an den tatsächlichen w/z-Wert in der Praxis kann derart erfolgen, dass die ermittelte Konzentration über den spezifischen freien Wassergehalt korrigiert wird. Erfolg versprechende Zemente sollten abschließend in einem Beton mit der entsprechenden alkaliempfindlichen Gesteinskörnung und der geplanten Betonzusammensetzung überprüft werden.

### *5.1.2.3 Verhalten alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen*

Die Erkenntnisse zum Schädigungsablauf liefern einen Ansatz zur Erklärung unterschiedlicher Verhaltensweisen verschiedener alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen. Bei porösen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen wie norddeutschem Kies mit Opalsandstein und Flint wird der Einfluss einer abfallenden Viskosität eher wirksam als bei einer dichten Gesteinskörnung. Die Ursache dafür ist, dass bei dieser Gesteinskörnung ein Verdrängungsraum für das ASH vorhanden ist, der eine gewisse Volumenvergrößerung ohne Gefügeschädigung ermöglicht. Bei einer weiteren Wasseraufnahme kann dann die abfallende Viskosität schneller wirksam werden. Das vorrangige Auftreten eines Pessimums bei porösen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, das im Rahmen dieser Arbeit auf die Wechselwirkungen zwischen Volumenzunahme und Viskosität des ASHs zurückgeführt werden konnte, bestätigt dies.

## **5.2 Prüfung von Beton mit CEM I-Zement**

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Auswirkung verschiedener Phänomene auf eine schädigende AKR unter Laborprüfbedingungen sind in Tafel 5-1 für Beton mit CEM I-Zement zusammenfassend dargestellt. Bezogen auf die untersuchten Lagerungsarten konnten die im Folgenden aufgeführten Erkenntnisse gewonnen und Schlussfolgerungen gezogen werden.

## 5.2.1 Simulierte Außenlagerung (SAL) – FIZ Außenlagerung

### 5.2.1.1 Auswirkung der Umgebungsbedingungen auf eine AKR

Bei der Lagerung SAL wirken sich hauptsächlich die **Feuchtebedingungen** während der siebentägigen Nachbehandlung der Probekörper in der 20 °C-Nebelkammer negativ auf die Voraussetzungen für eine schädigende AKR in der Induktionsphase aus. Bezogen auf die bei den Untersuchungen eingesetzten 10-cm Würfel wird durch deren Wasseraufnahme die Alkalikonzentration der Porenlösung bis zum Alter von 7d (Ende der Feuchtlagerung) um etwa 10 % abgesenkt. Ursache für den starken Einfluss ist die infolge der Hydratation des Zementklinkers auftretende Sogwirkung im Porensystem des Zementsteins. Zusätzlich werden etwa 7 % Alkalien in diesem Zeitraum ausgelaugt.

Während der anschließenden Wechsellagerung bzw. der eigentlichen Außenlagerung auf dem Dach wird der negative Effekt der Wasseraufnahme dadurch wieder ausgeglichen, dass die Probekörper bis zu einem bestimmten Grad (abhängig von der Probekörpergröße) wieder austrocknen, sich die Porenlösung wieder aufkonzentriert und sich die Alkalikonzentration ihrem ursprünglichen Wert wieder annähert. Bei schlanken Probekörpern (10x10x50 cm<sup>3</sup> Balken) muss sogar in Betracht gezogen werden, dass sie ggf. soweit austrocknen, dass die innere Feuchte zur Auslösung einer Gefügeschädigung infolge quellenden ASHs nicht mehr ausreicht (Abschnitt 2.4.5.2). Demgegenüber setzt sich eine Auslaugung im weiteren Lagerungsverlauf in geringen Raten fort. Beide Phänomene können einander im Hinblick auf die Alkalikonzentration der Porenlösung im Probekörper ausgleichen, so dass diesbezüglich langfristig keine wesentlichen Auswirkungen auf die Voraussetzungen einer AKR mehr zu erwarten sind (Bild 4-17).

Im Hinblick auf das gewählte **Temperaturregime** wurden keine Anzeichen festgestellt, die auf eine Beeinflussung der Voraussetzungen für eine AKR im Vergleich zu einem der Witterung ausgesetzten gewöhnlichen Konstruktionsbeton hindeuten. Gleiches gilt für die der Schädigungsphase zuzuordnenden chemischen und mechanischen Wechselwirkungen und Verhältnisse bei einer schädigenden AKR. Die Ergebnisse der simulierten Außenlagerung können deshalb bezüglich des Temperatureinflusses auf eine schädigende AKR als Referenz für die weiteren Lagerungsbedingungen dienen.

Tafel 5-1: Auswirkung unterschiedlicher Phänomene in Beton mit Zement CEM I (1,3) (Betonalter bis 90d,  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$ ) auf das Auftreten einer schädigenden AKR in Abhängigkeit von der Lagerung und bezogen auf Probekörper mit einem Verhältnis  $A/V = 0,6 \text{ m}^{-1}$

	Induktionsphase				Schädigungsphase
bei Lagerung	<b>Auswirkung der Feuchtebedingungen auf die</b>				
	Porenlösungskonzentration infolge				Wasseraufnahme des ASH
	Wasseraufnahme		Auslaugung		
	< 28d	≥ 28d	< 28d	≥ 28d	
Außenlagerung	↘	→	↘	↘	keine Änderung
40 °C-Nebelkammer	↘	↘	↓	↓	beschleunigt
60 °C über Wasser	↗	↗	↘	↓	stark beschleunigt
	Betontechnologische/prüftechnische Einflussfaktoren				
	w/z-Wert		Zementgehalt, Alkali-gehalt im Zement, Probekörpergröße		Alkaligehalt und Alkaliart in der Porenlösung
bei Lagerung	<b>Auswirkung der Temperaturerhöhung auf die/den</b>				
	Ionenkonzentration in der Porenlösung		Anteil im Gefüge an		Viskosität des ASH
	Na+K	OH <sup>+</sup>	CH	V <sub>kap</sub>	
Außenlagerung	Referenz				keine Änderung
40 °C-Nebelkammer	→	→	→	↘	abnehmend
60 °C über Wasser	↘	↘	→	↓	stark abnehmend
* nur durch die Instabilität von Ettringit bedingte Auswirkung					
→ weitgehend unveränderte Bedingungen					
↘/↗ > 5 % Ab- bzw. Zunahme der entsprechenden Parameter					
↓ > 15 % Abnahme des entsprechenden Parameter					

### 5.2.1.2 Schlussfolgerungen für die Praxis

Die während der Nachbehandlung in der 20 °C-Nebelkammer bei der Außenlagerung auftretende Verdünnung der Porenlösung infolge Wasseraufnahme ist von temporärer Bedeutung, da sie durch eine nachfolgende Austrocknung wieder ausgeglichen wird. Sie führt somit allenfalls zu einem verzögerten Auftreten einer AKR im Vergleich zu einem der Witterung ausgesetzten Konstruktionsbeton.

Der Verlust der Alkalien durch Auslaugung ist dagegen nicht reversibel. In grenzwertigen Fällen, in denen der eingangs im Beton enthaltene wirksame Alkaligehalt gerade zur Auslösung einer AKR gereicht hätte, wird dadurch eine schädigende AKR ggf. nicht erkannt. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist, vor allem bei den in der Praxis sehr kompakten Probekörpern, sehr gering. Um das Restrisiko jedoch weiter zu minimieren, bieten sich folgende Möglichkeiten an (jeweils bei 20 °C):

- Lagerung der Probekörper bis zum 7. Tag nach der Herstellung in der Schalung, abgedeckt mit Folie, oder
- Nach dem Ausschalen Lagerung bis zum 7. Tag eingepackt in Folie (eng anliegend).

Erstgenannte Maßnahme lässt sich auf Grund der Größe der Probekörper einfacher umsetzen.

### 5.2.2 40 °C-Nebelkammerlagerung

#### 5.2.2.1 Auswirkung der Prüfbedingungen auf eine AKR

Durch die **Feuchtebedingungen** in der 40 °C-Nebelkammer sind die Betonprobekörper nach dem Ausschalen dauerhaft einer direkten Beaufschlagung mit Wasser ausgesetzt. Entsprechend nehmen die Probekörper schnell Wasser auf, was zu einer Verdünnung der Porenlösung um 10 bis 12 % führt. Darüber hinaus setzt umgehend eine intensive Auslaugung ein. Beide Phänomene zusammen führen bis zum Alter von 28d bereits zu einer Reduzierung der Alkalikonzentration in der Porenlösung um rd. 25 %. Bei schnell und vor allem bei langsam reagierenden Gesteinskörnungen werden dadurch die Auslösung einer AKR (Induktionsphase) weniger wahrscheinlich und eine potentiell schädigende AKR in der Praxis dadurch unterschätzt.

Im weiteren Verlauf nimmt die Verdünnung der Porenlösung infolge einer Wasseraufnahme nur noch geringfügig zu. Jedoch setzt sich die Auslaugung uneingeschränkt weiter fort, so dass nach 91d die Alkalikonzentration der Porenlösung in einem Betonprobekörper mit einem Querschnitt von 10x10 cm<sup>2</sup> um mehr als 35 % geringer sein kann als ursprünglich vorgesehen. Das heißt, langfristig werden die Voraussetzungen für eine AKR immer ungünstiger.

Die erhöhte **Lagerungstemperatur** hat für CEM I-Beton nur einen untergeordneten Einfluss auf das Auftreten einer AKR. Sie setzt bei einer vergleichbaren Alkalikonzentration in der Porenlösung ein wie unter praktischen Bedingungen. Leicht verzögernd wirkt sich ggf. ein gegenüber der Praxis etwas verdichtetes Porengefüge im jungen Betonalter auf die Voraussetzungen für eine AKR aus.

Es wirkt der Ionendiffusion (Nachlieferung von Alkalien) und dem Wassertransport (Quellen) entgegen.

Deutlicher ist der Einfluss der Temperatur in der Schädigungsphase. Sie ist zum einen verantwortlich für eine schnellere Wasseraufnahme durch das ASH – eine Gefügeschädigung wird dadurch eher erreicht. Zum anderen nimmt bei erhöhter Lagerungstemperatur die Viskosität des ASHs ab. Dadurch nimmt ihr Einfluss auf den Schädigungsgrad im Beton zu (Bild 4-52), so dass dieser ggf. abnimmt und eine Betonschädigung infolge AKR in der Praxis unterschätzt wird. Am wahrscheinlichsten ist dies bei der Prüfung poröser alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen. Diese Gesteinskörnungen weisen in der Regel auch ein Pessimum auf, dessen Lage ebenfalls von der Viskosität des ASHs und damit von der Temperatur abhängig ist.

### 5.2.2.2 Schlussfolgerungen für die Praxis

Die Betonprüfung (CEM I) in der 40 °C-Nebelkammer wird bislang hauptsächlich zur Bestimmung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen eingesetzt. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zum Einfluss bestimmter betontechnologischer Parameter (Zementgehalt, Alkaligehalt im Zement, w/z-Wert) auf eine AKR durchgeführt.

#### Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen

Die Qualität des Prüfverfahrens gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 wird bisher dadurch gewährleistet, dass die Grenzwerte an dem Verhalten der Gesteinskörnungen in der Praxis kalibriert wurden. Es ist anzunehmen, dass der negative Einfluss von Wasseraufnahme und Auslaugung auf die Voraussetzungen einer AKR durch die Verwendung eines CEM I-Zements mit sehr hohem wirksamen Alkaligehalt kompensiert wird. Dieses Vorgehen beinhaltet besonders für schwach empfindliche Gesteinskörnungen ein Restrisiko (Reaktion nur bei sehr hoher Porenlösungskonzentration). Entsprechend sollten zukünftig:

- Auslaugung und Wasseraufnahme während der Prüfung minimiert werden, z.B. durch eine Lagerung über Wasser (ausreichende Feuchte muss gewährleistet bleiben),
- die Messung der Längenänderung am warmen Probekörper fortgeführt werden; eine Umlagerung von abgekühlten Probekörpern in feuchtwarme Umgebungsbedingungen würde zur Kondensation von Wasser auf der Probekörperoberfläche und entsprechender Auslaugung führen,
- möglichst kompakte Probekörper gewählt werden, um eine dennoch auftretende Auslaugung zu minimieren.

Abfallende Schädigungsgrade infolge einer geringeren Viskosität des ASHs lassen sich kaum vermeiden, wenn die Prüfzeiträume praktikabel bleiben sollen. Parallel treten in diesen Fällen jedoch intensive Ausscheidungen auf den Probekörperoberflächen auf. Eventuell lassen sich diese in die Bewertung einbeziehen. Bei Lagerung über Wasser könnte der im Wasserbad gelöste Kieselsäureanteil ein Indiz sein. Weiterführende Untersuchungen hierzu sind jedoch erforderlich.

Auf keinen Fall darf bei umfangreichen Ausscheidungen und ausbleibender Dehnung darauf geschlossen werden, dass in der Praxis eine Gefügeschädigung ausbleibt. Eine geringere Viskosität des ASHs infolge geringerer Temperatur, die ein Eindringen desselben in die Mörtelmatrix unterbindet, kann in der Praxis zu signifikanten Betonschäden führen.

#### Performance-Prüfung von CEM I-Beton

Bei der Performance-Prüfung werden gegenüber der Prüfung der Alkaliempfindlichkeit vor allem der w/z-Wert und der Zementgehalt variiert. Diesbezüglich ist zu beachten, dass bei geringen w/z-Werten die Wasseraufnahme deutlich zunimmt und bei geringen Zementgehalten und Alkaligehalten im Zement der Einfluss einer Auslaugung relativ zu einem Referenzbeton ausgeprägter ist. Eine schädigende AKR wird in diesen Fällen ggf. geringfügig unterschätzt.

#### Prüfung einer Alkalizufuhr von außen

Auf Grund der Untersuchungsergebnisse in Abschnitt 4.5.3.4 kann angenommen werden, dass in Abhängigkeit der Zusammensetzung des ASHs (Stückenwasserglas) und damit des Alkaligehalts der Porenlösung (Zements) unter praxisnahen Temperaturbedingungen prägnantere Unterschiede auftreten als bei erhöhten Lagerungstemperaturen. Ferner nimmt auf Grund der Überlagerung der Einflüsse aus hoher Temperatur und hohem Alkaligehalt im ASH auf dessen Viskosität die Gefahr zu, eine AKR im Labor unter reaktionsbeschleunigenden Bedingungen zu unterschätzen. Es erscheint daher ratsam, Untersuchungen zum Einfluss einer Alkalizufuhr von außen auf die Schadensintensität vornehmlich bei praxisnahen Temperaturen durchzuführen.

### *5.2.3 Lagerung bei 60 °C über Wasser*

#### *5.2.3.1 Auswirkung der Prüfbedingungen auf eine AKR*

Die **Feuchtebedingungen** während der Lagerung bei 60 °C über Wasser sind im Hinblick auf den Einfluss von Wasseraufnahme und Auslaugung auf die Voraussetzungen einer AKR in der Induktionsphase besser geeignet, um das Verhalten von CEM I-Betonen in der Praxis zu beurteilen (Tafel 5-1). In Abhängigkeit des w/z-Werts tritt nur eine mehr oder weniger moderate Wasserabgabe ein, die zu einer leichten Aufkonzentration der Porenlösung führt. Gleichzeitig lau-

gen die Probekörper in den ersten 28d nur moderat aus (ca. 10 % Verlust). Dies führt insgesamt dazu, dass die Alkalikonzentration in der Porenlösung bis zu diesem Betonalter mit der unter praktischen Verhältnissen in etwa vergleichbar bleibt (Bild 4-14). Im weiteren Verlauf setzt dann eine intensivere Auslaugung ein, die die Alkalikonzentration in der Porenlösung um mehr als 30 % abmindern kann. Da selbst bei langsam reagierenden Gesteinskörnungen unter Praxisbedingung davon auszugehen ist, dass eine AKR im Zeitraum vor 28d einsetzt, kann, bezogen auf den Feuchteinfluss, insgesamt von einer weitgehend korrekten Abbildung der Induktionsphase ausgegangen werden.

Demgegenüber werden die Effekte aus einer erhöhten *Lagerungstemperatur* im Vergleich zur 40 °C-Nebelkammer noch verstärkt (vgl. 5.2.2.1) bzw. es kommen Weitere hinzu. Neben einem temporär dichteren Gefüge (Behinderung von Ionendiffusion und Wassertransport) wurde in den Untersuchungen eine konstant um etwa 50 mmol/l geringere Alkalikonzentration in der Porenlösung festgestellt. Darüber hinaus steht der OH<sup>-</sup>-Ionengehalt nicht mehr im Gleichgewicht mit der Alkalikonzentration; er nimmt deutlich ab. Während für die erste Beobachtung kein eindeutiger Grund gefunden werden konnte, ist der geringere Anteil an OH<sup>-</sup>-Ionen auf die einsetzende Instabilität des Ettringits bei dieser Lagerungstemperatur zurückzuführen. Dadurch freigesetzte SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ionen sättigen einen Teil der Alkaliionen zuungunsten der OH<sup>-</sup>-Ionen ab. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer AKR ist somit geringfügig kleiner. Ggf. wird dies jedoch durch eine höhere Löslichkeit der alkaliempfindlichen Kieselsäure (Bild 2-4) ausgeglichen.

Die Ausführungen zur Schädigungsphase in der 40 °C-Nebelkammer gelten im Wesentlichen analog (schnellere Wasseraufnahme durch das ASH). Die infolge Temperturerhöhung weitere Verflüssigung des vergrößert jedoch die Gefahr, dass in der Schädigungsphase auch bei dichten Gesteinskörnungen der Einfluss der Viskosität auf den Schädigungsgrad im Beton zunehmend wirksam wird. Gegenüber der Praxis treten dadurch ggf. deutlich kleinere Schädigungsgrade auf und eine schädigende AKR wird tendenziell unterschätzt.

### 5.2.3.2 *Schlussfolgerungen für die Praxis*

Die Lagerung von Probekörpern über Wasser stellt nach den vorliegenden Ergebnissen die am besten geeignete Methode dar, um während der Laborprüfung bis zum Eintritt einer AKR (Induktionsphase) und bezogen auf die Feuchtebedingungen für die Praxis repräsentative Bedingungen zu erhalten. Die im weiteren Verlauf auftretende Auslaugung lässt sich dadurch minimieren, dass die Längenänderung am warmen Probekörper gemessen wird. Die Kondensation

von Wasser auf dem kalten Probekörper, die eine Auslaugung unterstützt, wird dadurch vermieden.

Der zunehmende Einfluss der Viskosität des ASHs auf den Schädigungsgrad erfordert jedoch eine erhöhte Sensibilität bei der Auswertung von Prüfergebnissen. Neben der standardmäßig bestimmten Dehnung von Prismen können die Berücksichtigung von Ausscheidungen auf der Oberfläche (vgl. Abschnitt 5.2.2.2) und ggf. im Anschluss an die Prüfung durchgeführte mikroskopische Analysen die Aussagefähigkeit dieser Prüfung erhöhen. Ohne derartige Maßnahmen ist die Prüfung von porösen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, die viel Gel bilden, bei dieser Lagerung nicht zu empfehlen.

Im Übrigen gelten die Ausführungen zu einer Performance-Prüfung und der Untersuchung einer Alkalizufuhr auf S. 164 auch für die Lagerung bei 60 °C über Wasser.

## 5.3 Prüfung von Beton mit CEM II/A-Zementen

### 5.3.1 Auswirkung der Prüfbedingungen auf eine AKR

In Tafel 5-2 sind in Abhängigkeit der untersuchten Lagerungen und den eingesetzten weiteren Hauptbestandteilen im Zement CEM II/A die Auswirkungen der Umgebungsbedingungen auf eine AKR dargestellt. Im Vergleich zu Beton ausschließlich mit CEM I-Zement (Tafel 5-1) lassen sich daraus einige Verschiebungen ableiten.

Im Hinblick auf den Einfluss der **Feuchtebeanspruchung** während der untersuchten Lagerungen lässt sich Folgendes feststellen:

- Wasseraufnahme bzw. -abgabe sowie eine Auslaugung treten bei Verwendung von Zementen CEM II/A in vergleichbarem Umfang wie bei CEM I-Zement auf, wenn die Probekörper gemäß dem Außenlagerungsregime behandelt werden. Eine AKR wird u.U. minimal unterschätzt.
- In der 40 °C-Nebelkammer führt eine Wasseraufnahme der Probekörper mit Zementen CEM II/A zu einer Verdünnung der Porenlösung in einer vergleichbaren Größenordnung wie bei Verwendung von CEM I-Zement. Die Abminderung der Porenlösungskonzentration infolge Auslaugung ist dagegen im jungen Betonalter (< 28d) unabhängig vom eingesetzten weiteren Hauptbestandteil geringer. Diese Tendenz setzt sich bei Verwendung von Puzzolanen im Zement CEM II/A weiter fort. Hüttensandhaltige Zemente führen dagegen langfristig zu einer Reduzierung der Porenlösungskonzentration infolge Auslaugung wie bei Verwendung von CEM I-Zement. Die Tendenz, eine AKR in der

40 °C-Nebelkammer zu unterschätzen, ist somit gegenüber CEM I-Beton vor allem bei Verwendung von puzzolanhaltigem CEM II/A-Zement geringer. Das Risiko bleibt dennoch hoch.

- Wie bei Verwendung von CEM I-Zement wirkt sich bei 60 °C über Wasser eine Wasseraufnahme nicht negativ auf die Porenlösungskonzentration in Beton mit CEM II/A-Zement aus. Zusätzlich tritt bei keinem der CEM II/A-Zemente bis zum Alter von 28d eine starke Auslaugung auf, so dass die Voraussetzungen für ein AKR bei dieser Lagerung infolge der Feuchtebelastung kaum beeinflusst werden (Eintritt einer AKR < 28d). Langfristig ist dagegen bei Verwendung von hüttensandhaltigem Zement mit einer deutlichen Auslaugung und entsprechenden Reduzierung der Alkalikonzentration in der Porenlösung des Betons zu rechnen (entspricht dem Verhalten von CEM I-Zement).

Die wesentlichen Unterschiede zum Verhalten von Beton mit CEM I bezüglich einer Feuchtebeaufschlagung treten somit auf, wenn Puzzolane verwendet werden. Vor allem der Einfluss einer Auslaugung ist geringer ausgeprägt.

Um das Auftreten einer AKR zu unterbinden, muss, insofern dies durch die Einbindung von Alkalien in Reaktionsprodukte gewährleistet werden soll, die Reaktion vor Erreichen der kritischen Konzentration einsetzen. In Abhängigkeit der **Temperatur** bei den verschiedenen Lagerungen hat sich dazu Folgendes gezeigt:

- Die Reaktion von Hüttensand, Flugasche und Silikastaub setzt relativ zu einer AKR mit der sehr reaktiven Gesteinskörnung OF (1d) mit ansteigender Temperatur immer früher ein, bis sie bei 40 °C (S, D) bzw. 60 °C (V) parallel mit einer AKR beginnt (Bild 4-24). Die Wahrscheinlichkeit, eine AKR durch Alkalibindung zu vermeiden, steigt damit aus reaktionskinetischer Sicht mit ansteigender Temperatur an. Eine AKR in der Praxis wird dadurch ggf. unterschätzt.
- Gleiches gilt im Vergleich zum Beginn einer AKR mit der langsamer reagierenden Gesteinskörnung SKH (28d); Hüttensand und Silikastaub reagieren grundsätzlich vor der Gesteinskörnung, jedoch mit ansteigender Temperatur mit wachsendem relativem Abstand. Flugasche reagiert bei Lagerung SAL parallel, bei höheren Temperaturen früher (Bild 4-24).

Das Erreichen des kritischen Alkaligehalts wird über eine Verdünnung (geringere Alkalifreisetzung als durch Klinker) hinaus dadurch bestimmt, in welchem Umfang durch die Reaktion von Hüttensand oder Puzzolanen bis zum theoretischen Einsetzen einer AKR Alkalien gebunden werden. Dazu gibt Tafel 5-2 an, dass bei Verwendung von Puzzolanen und erhöhter Lagerungstemperatur im

Tafel 5-2: Auswirkung unterschiedlicher Phänomene in Beton mit CEM II/A-Zement (Betonalter bis 90d,  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$ ) auf das Auftreten einer schädigenden AKR in Abhängigkeit von der Lagerung und dem eingesetzten Hauptbestandteil, Probekörper mit einem Verhältnis A/V = 0,6 m-1

		Induktionsphase				Schädigungsphase		
bei	Lagerung	Auswirkung der Feuchtebedingungen auf die Porenlösungskonzentration infolge				Wasseraufnahme des ASH		
		Wasseraufnahme		Auslaugung				
		< 28d	≥ 28d	< 28d	≥ 28d			
Außenlagerung	S	↘	→	↘	↘	keine Änderung		
	V	↘	→	↘	↘			
	D	↘	↘	↘	↘			
40 °C-Nebelkammer	S	↘	↘	↘	↘	beschleunigt		
	V	↘	↘	↘	↘			
	D	↘	↘	↘	↘			
60 °C über Wasser	S	→	→	↘	↘	stark beschleunigt		
	V	→	→	→	↘			
	D	→	↘	→	↘			
		Betontechnologische/prüftechnische Einflussfaktoren				Alkaligehalt und Alkaliart in der Porenlösung		
		w/z-Wert	Zementgehalt, Alkaligehalt im Zement, Probekörpergröße					
bei	Lagerung	Hauptbestandteil	Auswirkung der Temperaturerhöhung auf die/den				Viskosität des ASH	
			Reaktion des Hauptbestandteils	Ionenkonzentration in der Porenlösung		Anteil im Gefüge an		
				Na+K	OH <sup>*</sup>	CH		V <sub>kap</sub>
Außenlagerung	S	3d	Referenz				keine Änderung	
	V	28d						
	D	3d						
40 °C-Nebelkammer	S	1d	→	→	→	↓	abnehmend	
	V	7d	↓	→	↓	↓		
	D	1d	↓	→	↓	↓		
60 °C über Wasser	S	1d	→	↘	→	↓	stark abnehmend	
	V	1d	↓	↘	↓	↓		
	D	1d	↓	↘	↓	↓		
<p>* nur durch die Instabilität von Ettringit bedingte Auswirkung</p> <p>→ weitgehend unveränderte Wahrscheinlichkeit</p> <p>↘/↗ &gt; 5 % Ab- bzw. Zunahme der entsprechenden Parameter</p> <p>↓ &gt; 15 % Abnahme des entsprechenden Parameter</p>								

Betonalter bis 91d deutlich geringere Alkalikonzentrationen in der Porenlösung vorliegen als unter praxisrelevanten Lagerungsbedingungen (siehe auch Bild 4-25 und Bild 4-26). Das Erreichen der kritischen Alkalikonzentration ist dadurch weniger wahrscheinlich, so dass eine schädigende AKR in Laborprüfungen bei erhöhten Temperaturen unterschätzt wird, wenn Puzzolane im Zement eingesetzt werden.

Zusätzlich wird durch die beschleunigte Reaktion der Puzzolane bei erhöhter Temperatur der CH-Anteil im Zementstein und in der Kontaktzone reduziert. Infolgedessen kann die semipermeable Membran vor allem bei porösen Gesteinskörnungen weniger kompakt oder nur partiell ausgebildet sein und ggf. ihre Wirkung (Abschnitt 5.1.1) verlieren. Die Eigenschaften des im Innern des Gesteinskorns gebildeten ASHs sind dann für den Aufbau eines osmotischen Drucks entscheidend. Da jedoch gleichzeitig auch die Viskosität des ASHs bei höherer Temperatur abfällt, nimmt die Schadensintensität insgesamt ab (Bild 4-52, rechts). Die Gefahr einer Fehleinschätzung steigt in diesem Fall weiter an.

Im Gegensatz zu Puzzolanen im Zement CEM II/A wird die Reaktion von Hütensand wie die des Portlandzementklinkers in Bezug auf die Auslösung einer AKR nicht wesentlich durch die Lagerungstemperatur beeinflusst. Die Gefahr einer Fehleinschätzung bei erhöhter Lagerungstemperatur ist deshalb bei CEM II/A-S weniger gegeben. Jedoch findet, wie bei den anderen Zementen CEM II/A auch, bei erhöhten Lagerungstemperaturen eine Gefügeverdichtung statt, die eine ausreichende Nachlieferung an Wasser und Alkalien zum Aufbau eines osmotischen Drucks bzw. zur Fortführung einer AKR behindert.

### 5.3.2 *Schlussfolgerungen für die Praxis*

Die in den Abschnitten 5.2.1.2 und 5.2.2.2 für die jeweilige Lagerung dargelegten Vorschläge können aufgegriffen werden, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse bei Verwendung von Zementen CEM II/A im Hinblick auf die Auswirkung der Feuchtebedingungen zu verbessern.

Die infolge der erhöhten Lagerungstemperatur nur sehr ungenügende Abbildung der Verhältnisse im Beton unter praktischen Bedingungen, wenn puzzolanhaltige Zemente eingesetzt werden, ist insbesondere für die Entwicklung einer Performance-Prüfung für Beton kritisch. Ein abgesicherter Ansatz lässt sich dafür aus den vorliegenden Ergebnissen nicht ableiten. Ggf. ist jedoch eine ausreichend lange konservierte Vorlagerung von Betonprobekörpern bei 20 °C eine Möglichkeit. Die Ergebnisse zur Entwicklung der Alkalikonzentration und dem CH-Gehalt im Zementstein deuten dazu an, dass sich bei Verwendung von CEM II/A-D nach 28d bis 56d in der simulierten Außenlagerung wieder vergleichbare Verhältnisse einstellen wie unter beschleunigten Reaktionsbedingungen bei

40 °C bzw. 60 °C. Bei Verwendung von Flugasche scheint dafür ein etwas längerer Zeitraum von mindestens 56d bis 91d erforderlich zu sein.

Im Anschluss können die Probekörper bei erhöhter Temperatur von 40 °C oder 60 °C über Wasser gelagert werden. Die Wasseraufnahme und damit der Aufbau eines Quelldrucks durch u.U. während der Vorlagerung gebildeten ASHs werden dadurch forciert.

## 6 Resümee und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse zum Ablauf einer schädigenden AKR sowie zu den Bedingungen für eine AKR während der Lagerung von Betonprobekörpern gemäß den Vorschriften der aktuellen Alkali-Richtlinie Teil 3 (40 °C-Nebelkammer) bzw. dem französischen Prüfverfahren gemäß NF P 18454 (bei 60 °C über Wasser). Herauszuheben sind im Hinblick auf die *Induktionsphase* einer schädigenden AKR:

- das Einsetzen einer AKR mit Erreichen einer von der Gesteinskörnung abhängigen kritischen Alkalikonzentration in der Porenlösung, infolge der schnellen Klinkerhydratation ist das bis zum Alter von 28d i.d.R. der Fall,
- die vor einer AKR einsetzende, z.T. extreme Abminderung der Alkalikonzentration der Porenlösung infolge Wasseraufnahme und Auslaugung während der 40 °C-Nebelkammerlagerung, sowie
- die in Relation zu einer AKR mit erhöhter Temperatur zunehmend beschleunigte Reaktion vor allem puzzolanischer Hauptbestandteile im Zement; sie führt gegenüber praktischen Verhältnissen bereits im jungen Betonalter zu einer übermäßigen Verringerung der Alkalikonzentration der Porenlösung, dem CH-Anteil im Zementstein (Kontaktzone zum Gesteinskorn) und der Kapillarporosität.

Die genannten Phänomene und Wechselwirkungen führen dazu, dass während einer Laborprüfung die Voraussetzungen für das Auftreten einer AKR weniger gegeben sind als es unter praktischen Bedingungen anzunehmen ist. Eine schädigende AKR wird dadurch unter den beschriebenen Bedingungen tendenziell unterschätzt.

Für die *Schädigungsphase* einer AKR ist von vorrangiger Bedeutung, dass neben der Volumenzunahme durch das Reaktionsprodukt ab einer bestimmten Wasseraufnahme die Viskosität desselben den Schädigungsgrad eines Betons infolge AKR bestimmt. Dabei nimmt der Schädigungsgrad mit weiter zunehmender Wasseraufnahme und damit abfallender Viskosität des Reaktionsprodukts ab. Dies ist vor allem für poröse alkaliempfindliche Gesteinskörnungen

von Bedeutung, bei denen die mit der Wasseraufnahme ebenfalls einhergehende Volumenvergrößerung auf Grund des vorhandenen Verdrängungsraums nicht unmittelbar zu Ausbildung gefügeschädigender Quelldrücke führt. Darüber hinaus vergrößert eine erhöhte Lagerungstemperatur und ein höherer Alkaligehalt den Einfluss der Viskosität des Reaktionsprodukts auf den Schädigungsgrad – er wird zunehmend kleiner. Dies kann bei der Bewertung von Laborprüfergebnissen über die Induktionsphase betreffenden Wechselwirkungen hinaus dazu beitragen, dass eine schädigende AKR falsch eingeschätzt wird.

Die Erkenntnisse können zur Verbesserung der Übertragbarkeit von Prüfergebnissen aus AKR-Betonprüfverfahren verwendet werden. Dazu sind prüftechnische Veränderungen erforderlich. Im Hinblick auf die Auswirkungen der Feuchtebedingungen sind Maßnahmen wie die Einführung einer Lagerung über Wasser (40°C-Nebelkammer) oder das Messen warmer Probekörper (60 °C über Wasser) zielführend und schnell umsetzbar.

Vor einer Umsetzung der Vorschläge zur Beherrschung der Temperatureinflüsse sind jedoch zur Kontrolle der Reaktionskinetik

- die für eine konservierte Vorlagerung bei 20 °C notwendige Dauer in Abhängigkeit der weiteren Hauptbestandteile im Zement zu präzisieren, und
- die Auswirkung einer verspäteten Lagerung bei erhöhten Temperaturen auf die Schädigungsphase zu analysieren und im Vergleich zu baupraktischen Verhältnissen und Erfahrungen zu bewerten.

Einige Ergebnisse lassen sich darüber hinaus für andere Felder als die Entwicklung von AKR-Prüfverfahren verwenden. Die festgestellte, offenbar gesteinskörnungsspezifische kritische Alkalikonzentration in der Porenlösung zur Auslösung einer AKR kann der Entwicklung von NA-Zementen zu Grunde gelegt werden. Abzüglich etwaiger Vorhaltemaße zur Berücksichtigung weiterer Alkaliquellen im Beton zeigt sie die Grenzkonzentration auf, die von einem Zement bei einem vorgegebenen w/z-Wert zur Vermeidung einer schädigenden AKR nicht erreicht werden darf. Die Feststellung der AKR auslösenden Konzentration für weitere alkaliempfindliche Gesteinskörnungen ist diesbezüglich wünschenswert. Schlussendlich lässt sich das um den Einfluss der Viskosität erweiterte qualitative Modell zur Schädigungsphase in numerischen Simulationen einer schädigenden AKR verwenden. Eine quantitative Beschreibung der aufgezeigten Zusammenhänge ist dafür erforderlich.

## 7 Literaturverzeichnis

- [ACI 98] ACI-Committee 221: *State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity*. American Concrete Institute (Hrsg.), Farmington Hills, 1998.
- [ARS 06] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 12/2006: Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)*. Bonn, 17.05.2006.
- [Aue 01] Aue, W.; Dahms, J.: *Der Einfluss von Flint auf die Alkalireaktion im Beton*. In: *beton* 11 (2001), S. 602-609.
- [Bak 80] Bakker, R.F.M: *Über die Ursache des erhöhten Widerstands von Beton mit Hochofenzement gegen die Alkali-Kieselsäurereaktion und den Sulfatangriff*. RWTH Aachen, Dissertation, 1980.
- [Bak 83] Bakker, R.F.M: *The influence of test specimen dimensions on the expansion of alkali reactive aggregate in concrete*. In: *Alkalis in concrete – Research and Practice, Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference, Copenhagen, 1983, S. 369-375*.
- [Bar 83] Barneyback, R.S.: *Alkali-silica reactions in Portland cement concrete*. Purdue University, Dissertation, 1983.
- [Bat 92] Battagin, A.F.: *Influence of degree of hydration of slag on slag cements*. In: *9<sup>th</sup> International Conference on the Chemistry of Cement, Vol. III – Communication Papers – Theme II, National Council for Cement and Building Materials, New Delhi, 1992, S. 166-172*.
- [Ber 03] Bérubé, M.A.; Dorion, J.F.; Duchesne, J.; Fournier, B. Vézina, D. : *Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali-silica reactivity*. In: *Cement and Concrete Research* 33 (2003), S. 77-84.
- [Ber 04] Bérubé, M.A.; Fournier, B.: *Alkalis releasable by aggregates in concrete – significance and test methods*. In: *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15.-19- October 2004, Beijing, China, S. 17-30*.
- [Ber 92] Bérubé, M.A.; Duchesne, J.: *Evaluation of Testing Methods Used for Assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppressing Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction*. In: *Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings Fourth International Conference, Vol. 1, ACI SP-132, S. 549-575*.

- [Ber 94] Bérubé, M.A.; Fournier, B.: *Accelerated test methods for alkali-aggregate-reactivity*. In: Malhotra, V.M. (Ed.): *Advances in concrete technology, Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1994 (MSL 94-1(IR))*, S. 991-1044.
- [Bern 04] Berninger, A.M.: *Mikrostrukturelle Eigenschaften von Quarz als Bestandteil spät reagierender, alkaliempfindlicher Zuschläge*. Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2004.
- [Berr 05] Berra, M.; Mangialardi, T.; Paolini, A.E.: *Use of an ultra-accelerated concrete prism expansion test for alkali-silica reactivity assessment*. In: *Magazine of Concrete Research* 57 (2005), No.1, S. 39-47.
- [Bery 87] Berry, E.E.; Malhotra V.M.: *Fly ash in concrete*. In: *Supplementary Cementing Materials (V.M. Malhotra (Ed.))*, Minister of Supply and Services, Canada, 1987, S. 37-144.
- [Blan 94] Blankenburg, H.-J.: *Quarzrohstoffe*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1994.
- [Bly 98] Blyszynski, R.F.; Thomas, M.D.A.: *Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions*. In: *Advanced Cement Based Materials* 7 (1998), S. 66-78.
- [Böd 03] Bödecker W.: *Alkalireaktion im Bauwerksbeton – Ein Erfahrungsbericht*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.)), Heft 539, 2003.
- [Boh 05] Bohlander R.: Persönliche Mitteilung am 17.02.2005.
- [Böh 06] Böhm, M.; Schäfer, E.; Baetznner, S.: *Einfluss der Alkalität der Porenlösung auf die Auslösung einer schädigenden AKR*. In: *Tagungsbericht 16. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.)*, Weimar, 2006, Band 2, S.435-442.
- [Bok 01] Bokern, J.; Siebel, E.: *Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion durch Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel oder Zumahlzemente*. Schlussbericht zum AiF-Vorhaben Nr. 11424/1, unveröffentlicht.
- [Bok 02] Bokern, J.: *Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. In: *Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.)*, Beiträge zum 41. Forschungskolloquium des DAfStb am 11. und 12. Juli 2002 im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, 2002, S. 133-145.

- [Bok 02a] Bokern, J.; Siebel, E.: *Beurteilung der Auswirkung von Oberrhein-Zuschlag auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton*. Schlussbericht zum AiF-Vorhaben Nr. 12539 N/1.
- [Bok 04] Bokern, J.; Siebel, E.: *Alkali-Silica Reaction in Germany – Transfer of Laboratory Results to Practice*. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15-19 October 2004, Beijing, China, S. 490-498.
- [Bol 00] Bollmann, K.: *Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen*. Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2000.
- [Bolo 92] Bollotte, B.: *Development of an accelerated performance test on concrete for evaluation its resistance to AAR*. In: 9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, 1992, Conference Papers, Vol. 1, S.110-116.
- [Bon 73] Bonzel, J., Dahms, J.: *Alkalireaktion im Beton*. In: beton 23 (1973), H. 11, S. 495-500, und H. 12, S. 547-554.
- [Bon 86] Bonzel, J.; Krell, J.; Siebel, E.: *Alkalireaktion im Beton*. In: beton 36 (1986), H. 9, S. 345-349 und H.10, S. 385-389.
- [Bor 06] Borchers, I.; Böhm, M.: *Vermeidung einer schädigenden AKR – Konzepte und Prüfverfahren*. Vortrag anlässlich der VDZ-Fachtagung „Betontechnik“, Düsseldorf, 07.12.2006.
- [Bra 05] Brameshuber, W.; Spörel, F.: *Messung des tiefenabhängigen Feuchtegehaltes an Betonbauteilen*. In: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), Beiträge zum Kolloquium Frostwiderstand von Beton in Labor und Praxis am 29. und 30. September 2005 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf, S. 83-90.
- [Bro 02] Broekmans, M.A.T.M.: *The alkali-silica reaction: Mineralogical and geochemical aspects of some Dutch concretes and Norwegian mylonites*. University of Utrecht, 2002, Dissertation.
- [Brod 82] Brodersen H.A.: *Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins*. RWTH Aachen, Dissertation, 1982.
- [Brou 93] Brouxel, M.: *The alkali-aggregate reaction rim: Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O and CaO chemical distribution*. In: Cement and Concrete Research 23 (1993), S. 309-320.
- [Cat 77] Catharin, P.: *Hydratationswärme und Festigkeitsentwicklung*. In: Zement und Beton 22 (1977), Nr. 4, S. 148-159.

- [Cha 05] Chatterji S.: *Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates*. In: Cement & Concrete Composites 27 (2005), S. 788-795.
- [Cha 78] Chatterji, S.: *An Accelerated Method for Detection of Alkali-Aggregate Reactivities of Aggregates*. In: Cement and Concrete Research 8 (1978), S. 647-650.
- [Cha 86] Chatterji, S.; Thaulow, N.; Jensen, A.D.: *Studies of alkali-silica reaction : Part3: Mechanism by which NaCl and Ca(OH)<sub>2</sub> affect the reaction*. In: Cement and Concrete Research 16 (1986), S.246-254.
- [Cha 87] Chatterji, S.; Thaulow, N.; Jensen, A.D.: *Studies of alkali-silica reaction : Part 4: Effect of different alkali salt solutions on expansion*. In: Cement and Concrete Research 17 (1987), S.777-783.
- [Cog 04] o. V.: *Wasserglasbroschüre*. Unveröffentlicht, erhalten von Cognis Deutschland GmbH & Co. KG.
- [Cog 05] o. V.: *Wasserglas – altbekannt, Anorganischer Kleber und Bindemittel*. Unveröffentlicht, erhalten von Cognis Deutschland GmbH & Co. KG.
- [Con 93] Cong, X.D.; Kirkpatrick, R.J.; Diamond, S.: *Silicon-29 MAS NMR spectroscopic investigation of alkali silica reaction product gel*. In: Cement and Concrete Research 23 (1993), S. 811-823.
- [Coo 99] Cook, R.A.; Hover, K.C.: *Mercury porosimetry of hardened cement pastes*. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 6, S. 933-943
- [Cri 92] Criaud, A.; Vernet, C. ; Defossé, C.: *A Rapid Test for Detecting the Reactivity of Aggregates: The Microbar Method*. In: 9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, 1992, Conference Papers, Vol. 1, S. 201-209.
- [Cri 95] Criaud, A.; Defossé, C.: *Evaluating the reaction of actual compositions of concrete with respect to alkali-aggregate reactions – Preliminary testing at 110 °C and 150 °C*. In: Materials and Structures 28 (1995), S. 32-42.
- [CSA 00] Canadian Standards Association – CSA: *CSA A.23.2-27A Standard Practice to Identify Degree of Alkali-Reactivity of Aggregates and to Identify Measures to Avoid Deleterious Expansion in Concrete*. Rexdale, Ontario, 2000.
- [Dav 57] Davis, C.E.S.: *Studies in cement-aggregate reaction : XXV. Comparison of the expansions of mortar and concrete*. In: Australian Journal of Applied Science 8 (1957), S.222-234

- [Davi 86] Davies, G.; Oberholster, R.E.: *The effect of different outdoor exposure conditions on the expansion due to alkali silica-reaction*. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, 1989, S. 623-628.
- [Det 86] Detwiler, R.; Krishnan, K.; Mehta, P.: *Effect of blast furnace slag on the transition zone in concrete*. In: Proceedings Bryan and Katherine Mather International Symposium on Durability in Concrete, Atlanta, ACI-SP 100-6, Vol. 1, S. 63-72.
- [Deu 01] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*. Berlin, Beuth, 2001.
- [Deu 07] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*. Berlin, Beuth, 2007.
- [Deu 97] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*. Berlin, Beuth, 1997.
- [Deu 99] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb (Hrsg.): *Vorläufige Empfehlung des DAfStb zur Vermeidung möglicher schädigender Alkalireaktionen bei Verwendung von Kies-Splitt und Kies-Edelsplitt des Oberrheins als Betonzuschlag*. Berlin, Beuth, 1999.
- [Dia 06] Diamond, S.; Kotwica, L.; Olek, J.; Rangaraju, P.R.; Lovell, J.: *Chemical Aspects of Severe ASR Induced by Potassium Acetate Air-fild Pavement Deicer Solution*. In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> CANMET International Conference on Recent Advances in Concrete Technology (Bérubé Symposium), Montreal, 2006, S. 261-278.
- [Dia 81] Diamond, S.; Barneyback, R.S.; Struble L.J.: *On the physics and chemistry of alkali-silica reactions*. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa, 1981, S. 252/22.
- [Dia 81a] Diamond, S.; Lopes-Flores, F.: *Comparative studies of the effects of lignitic and bituminous fly ashes in hydrated cement systems*. In: Proceedings MRS Symposium: Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete, Pennsylvania, 1981, S. 112-123.
- [Dia 83] Diamond, S.: *Alkali reactions in concrete – Pore solution effects*. In: Alkalis in concrete – Research and Practice, Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference, Copenhagen, 1983, S. 155-166.

- [DIB 99] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): *Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Portlandhüttenzement CEM II/B-S mit einem höheren Na<sub>2</sub>O-Äquivalent als nach DIN 1164-1/A1 als NA-Zement für die Verwendung gemäß Alkali-Richtlinie, Teil 2*. Fassung Dezember 1999.
- [Dom 03] Dombrowski, K.: *Die Klima-Wechselagerung als effektives Prüfverfahren zur Untersuchung des Einflusses von Taumitteln auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. In: 15. Internationale Baustofftagung: 24.-27. September 2003 Weimar; Tagungsbericht Band 2, S.1205-1216.
- [Dro 92] Dron, R.; Brivot, F.: *Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction. Part 1: concepts*. In: Cement and Concrete Research 22 (1992), S. 941-948.
- [Duc 01] Duchesne, J.; Bérubé M.-A.: *Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali-silica reaction*. In: Cement and Concrete Research 31 (2001), S. 1057-1063.
- [Duc 92] Duchesne, J.; Bérubé, M.-A.: *An autoclave mortar bar test for assessing the effectiveness of mineral admixtures in suppressing expansion due to AAR*. In: The 9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, 1992, Conference Papers, Vol. 1, S. 279-286.
- [Duc 94] Duchesne, J.; Bérubé, M.-A.: *The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: Another look at the reaction mechanism part 1: concrete expansion and portlandite depletion*. In: Cement and Concrete Research 24 (1994), S. 73-82.
- [Duc 94a] Duchesne, J.; Bérubé, M.-A.: *The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: Another look at the reaction mechanism part 2: pore solution chemistry*. In: Cement and Concrete Research 24 (1994), S. 221-230.
- [Dun 74] Duncan, M.A.G.; Swenson, E.G.; Gillott, J.E.; Foran, M.R.: *Alkali-Aggregate Reactivity in Nova Scotia I. Summary of a Five Year Study*. In: Cement and Concrete Research 3 (1973), S. 55-69.
- [Fel 06] Feldrappe, V.: *Zum Frostwiderstand hochfester Betone mit Silikastaub*. TU Braunschweig, Dissertation, 2006.
- [FGSV 97] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): *Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen – Teil: Winterdienst*. FGSV-Verlag, Köln, 1997.

- [Fou 00] Fournier, B.; Bérubé, M.-A.; Rogers, C.A.: *Canadian standards association (CSA) standard practice to evaluate potential alkali-reactivity of aggregates and to select preventive measures against alkali-aggregate reaction in concrete structures*. In: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete – Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference, Québec City, June 2000, S. 633-642.
- [Fou 00a] Fournier, B.; Bérubé, M.-A. ; Frenette, J.: *Laboratory investigations for evaluating potential alkali-reactivity of aggregates and selecting preventive measures against alkali-aggregate reaction (AAR) – what do they really mean?*. In: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete – Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference, Québec City, June 2000, S. 287-296.
- [Fou 04] Fournier, B.; Chevrier, R.; Grosbois, de, M.; Lisella, R.; Folliard, K.; Ideker, J.; Shehatad, M.; Thomas, M.; Baxter, S.: *The accelerated concrete prism test (60 °C) : Variability of the test method and proposed expansion limits*. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15-19 October 2004, Beijing, China, S. 314-323.
- [Fou 04a] Fournier, B.; Nkinamubanzi, P.-C.; Chevrier, R.: *Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials to control alkali-silica reaction in concrete*. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15-19 October 2004, Beijing, China, S. 528-537.
- [Fran 04] Franke, L.; Witt, S.: *Schnelltest auf Alkalireaktion – Übertragbarkeit eines international anerkannten Schnelltests auf deutsche Verhältnisse*. In: Betonwerk + Fertigteiltechnik 70 (2004), Heft 5, S. 14-21.
- [Fran 98] Franke, L.; Bosold, D.; Eickemeier, K.: *Beurteilung der Alkalireaktivität von Zuschlägen – Anwendung und Grenzen der südafrikanischen NBRI-Testmethode*. In: beton 48 (1998), S. 470-475.
- [Fran 99] Franke, L.; Eickemeier, K.: *Beurteilung der Alkalireaktivität von Zuschlägen mit Hilfe der Rietveld-Methode*. In: 5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen – „MSR'99“, AIDIFICATIO Publishers, Freiburg, 1999, S. 509-518.
- [Fre 04] Freyburg, E.; Berninger, A.-M.: *Micro-processes being connected with alkali-silica reaction*. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15-19 October 2004, Beijing, China, S. 324-330.

- [Gil 73] Gillott, J.E.; Duncan, M.A.G.; Swenson, E.G.: *Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia – IV. Character of the reaction*. In: Cement and Concrete Research 3 (1973), S. 521-535.
- [Gla 81] Glasser, L.S.D.; Kataoke, N.: *The chemistry of alkali-aggregate reactions*. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa, 1981, S252/23.
- [Grä 86] Gräf, H.; Grube, H.: *Einfluss der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit*. In: beton 36 (1986), S. 184-187 (Teil 1) und S. 222-226 (Teil 2).
- [Gra 89] Grattan-Bellew P.E.: *Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregates*. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, 1989, S. 279-294.
- [Gra 96] Grattan-Bellew P.E.: *A critical review of accelerated ASR tests*. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, A. Shayan (ed.), Melbourne, 1996, S. 27-38.
- [Gro 00] Grosbois, de, M.: *Performance of the 60 °C-accelerated concrete prism test for the evaluation of potential alkali-reactivity of concrete aggregates*. In: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete – Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference, Québec City, June 2000, S. 277-286.
- [Gud 99] Gudmundsson, G.; Olafsson, H.: *Alkali reactions and silica fume – 20 years of experience in Iceland*. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), S. 1289-1297.
- [Här 95] Härdtl, R.: *Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluß auf die Betoneigenschaften*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 448, Beuth, Berlin, 1995.
- [Här 96] Härdtl, R.; Schießl, P.: *Einfluß von Steinkohlenflugasche auf Alkalireaktion in Beton*. In: Betonwerk + Fertigteiltechnik 62 (1996), Heft 11, S. 94-101.
- [Hei 05] Heinz, D.; Schmidt, K.: *Steinkohlenflugasche in Beton zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. In: Tagungsband BVK/VGB Fachtagung „Flugasche im Beton – Neue Erkenntnisse“, Frankfurt, 2005.

- [Hel 93] Helmuth, R.: *Mechanisms of Damage to Concrete by Alkali-Silica Reactivity*. In: National Research Council (Hrsg.) – Strategic Highway Research Program (SHRP), Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research, Report No. SHRP-C-342, National Academy of Sciences, Washington, 1993.
- [Her 92] Herr, R.; Wieker, W.: *The hydroxide-sulphate ion equilibrium in cement paste pore solutions and its significance to the theory of AAR in concrete*. In: The 9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, 1992, Conference Papers, Vol. 2, S. 440-450.
- [Hil 05] Hill, S.; Hüniger, K.-J.: *Zur direkten Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz*. In: Cement International 3 (2005), Heft 1, S. 104-119.
- [Hin 89] Hinrichs, W.; Odler, I.: *Investigation of the hydration of Portland blastfurnace slag cement: hydration kinetics*. In: Advances in Cement Research 2 (1989), Heft 5, S. 9-13.
- [Hob 89] Hobbs, D.W.: *Effect of mineral and chemical admixtures on alkali-aggregate reaction*. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 1989, S. 173-186.
- [Hob 92] Hobbs, D.W.: *Deleterious alkali-silica reactivity of a number of UK aggregates and an examination of the draft BS concrete prism test*. British Cement Association (Hrsg.), Wexham Springs, 1992.
- [Hob 93] Hobbs, D.W.: *Deleterious alkali-silica reactivity in the laboratory and under field conditions*. In: Magazine of Concrete Research 45 (1993), Heft 163, Juni, S. 103-112.
- [Hob 94] Hobbs, D.W.: *The effectiveness of PFA in reducing the risk of cracking due to ASR in concretes containing Cristobalite*. In: Magazine of Concrete Research 46 (1994), No 168, S. 167-175.
- [Hof 88] Hoffmann, D.; Funke, D.: *Die Infrarot-Spektroskopie als Methode zur Bestimmung der Alkaliempfindlichkeit von Betonzuschlagstoffen*. In: Silikattechnik 39 (1988), S. 341-344.
- [Hoh 03] Hohberg, I.: *Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 542, Beuth, Berlin, 2003.
- [Hol 85] Hollemann, A.F.; Wiberg, N.: *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. De Gruyter, Berlin, 1985.

- [Hoo 89] Hooton, D.; Rogers, C.A.: *Evaluation of rapid test methods for detecting alkali-reactive aggregates*. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, 1989, S. 439-444.
- [Hoo 96] Hooton, D.; *Recent developments in testing for ASR in North America*. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, A. Shayan (ed.), Melbourne, 1996, S. 280-287.
- [Hou 04] Hou, X.; Struble, L.J.; Kirkpatrick, R.J.: *Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite*. In: Cement and Concrete Research 34 (2004), S. 1683-1696.
- [Hün 06] Hüniger, K.-J.: *Zum Schädigungsmechanismus von Grauwacken im alkalischen Milieu von Beton*. In: Tagungsbericht 16. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), Weimar, 2006, Band 2, S.427-434.
- [Ido 61] Idorn, G.M.: *Studies of Disintegrated Concrete –Part I*. The Danish National Institute of Building Research, Copenhagen (1961) – Series: Progress Report N2.
- [Ido 92] Idorn, G.M.; Johansen, V.; Thaulow, N.: *Assessment of causes of cracking in concrete*. In: Materials Science of Concrete III, Skalny J. (Hrsg.), The American Ceramic Society, Westerville, 1992, S. 71-105.
- [Ido 97] Idorn, G.M.: *Concrete progress – from antiquity to third millennium*. Thomas Telford, 1997.
- [Ile 78] Iler, R.K.: *The chemistry of silica*. John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [Jak 93] Jakobsen, U.H.; Thaulow, N.; Johansen, V.: *Analyses of Sodium- and Potassium-Rich Droplets Observed on the Surface of Alkali-Silica Reactive Aggregates and on Gel in Polished Thin Sections*. In: Cement and Concrete Research 22 (1992), S. 1148-1160.
- [Jen 03] Jensen, J.C.; Bokern, J.; Nixon, P.: *The “PARTNER” Project – “European Standard Tests to Prevent Alkali Reactions in Aggregates”, EU-Project: GRD1-CT-2001-40103*. In: 15. Internationale Baustofftagung: 24.-27. September 2003 Weimar; Tagungsbericht Band 2, S.1083-1090.
- [Jens 00] Jensen, V.: *In-situ measurement of relative humidity and expansion of cracks in structures damaged by AAR*. In: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete – Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference, Québec City, June 2000, S. 849-858.

- [Jens 93] Jensen, V.: *Alkali Aggregate Reaction in Southern Norway*. University of Trondheim, 1993, Dissertation.
- [Jon 86] Jones T.N.; Poole, A.B.: *Alkali-Silica Reaction in Several U.K. Concretes: The Effect of Temperature and Humidity on Expansion, and the Significance of Ettringite Development*. In: Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference, Ottawa, Canada, 1986, S. 446-450.
- [Kir 05] Kirkpatrick, R.J.; Kalinichev, A.G.; Hou, X.; Struble, L.; *Experimental and molecular dynamics modeling studies of interlayer swelling: water incorporation in kanemite and ASR gel*. In: Materials and Structures 38 (2005), S. 449-458.
- [Knu 75] Knudsen, K.; Thaulow, N.: *Quantitative microanalyses of alkali-silica gel in concrete*. In: Cement and Concrete Research 5 (1975), S. 443-454.
- [Kol 86] Kollek, J.J.; Varma, S.P.; Zaris, C.: *Measurement of OH<sup>-</sup> concentration of pore fluids and expansion due to alkali-silica reaction in composite cement mortars*. In: 8<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986, S. 183-189.
- [Kön 99] König, R; Wagner, J.-P.: *Mikrosilica*. WOERMANN Bauchemie GmbH & Co. KG, Darmstadt, 1999.
- [Kro 75] Krogh, H.: *Examination of synthetic alkali-silica gels*. In: Symposium on Alkali-Aggregate Reaction Preventive Measures, Reykjavik, August 1975, S. 131-163.
- [Kuh 98] Kuhr, W.: *Wasserglas – Herstellung und Anwendung*. In: Henkel-Referate 34 (1998), S. 7 bis 13.
- [Lan 99] Lane, D.S.: *Virginia's Approach to Evaluation of Concrete Resistant to Alkali-Silica Reactions*. In: Transportation Research Record 1668, Paper No. 99-0400.
- [Lar 00] Larive, C.; Laplaud, A.; Coussy, O.: *The role of water in alkali-silica reaction*. In: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete – Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference, Québec City, June 2000, S. 61-69.
- [Larb 93] Larbi, J.A.: *Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete*. Heron 38 (1993), Heft 1.
- [LCP 94] Laboratoire Central de Ponts et Chaussées – LCPC : *Recommandations pour la prevention des desordres dus a l'alcali-reaction*. Paris, 1994.

- [Lea 98] Hewlett, P.C. (Hrsg): *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Arnold, London, 1998.
- [Len 81] Lenzner, D.: *Untersuchungen zu Alkali-Zuschlag Reaktion mit Opalsandstein aus Schleswig-Holstein*. RWTH Aachen, 1981, Dissertation.
- [Loc 00] Locher, F.W.: *Zement, Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Düsseldorf, Verlag Bau+Technik, 2000.
- [Loc 68] Locher, F.W.: *Chemischer Angriff auf Beton*. In: beton 17 (1967), S. 17-19 (Teil 1) und S. 47-49 (Teil 2).
- [Loc 73] Locher, F.W.; Sprung, S.: *Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion*. In: beton 23 (1973), H. 7, S. 303-306 und H. 8, S. 349-353.
- [Loc 75] Locher, F.W.; Sprung, S.: *Einflüsse auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton*. In: Zement-Kalk-Gips 28 (1975), H. 4, S. 162-169.
- [Lon 73] Longuet, P. ; Burglen, L. ; Zelwer, A. : *La phase liquide du ciment hydraté*. In : Revue des Matériaux de Construction 676 (1973), S. 35-41.
- [Luc 89] Lucke, K.: *Verhinderung von Betonschäden durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. In: Dokumentation der Tagung Betonsanierung – Korrosionsmechanismen und Sanierungstechniken an Stahlbetonkonstruktionen, Expertentreffen im Rahmen des WTZ-Abkommens, Universität Karlsruhe, 12.-15-April, 1989, S. 13-21.
- [Lud 74] Ludwig, U.; Wolff, G.; Hirche, D.: *Die Alkali-Kieselsäurereaktion*. Westdeutscher Verlag, Opladen, 1974.
- [Luk 88] Luke, K.; Glasser, F.P.: *Internal chemical evolution of the constitution of blended cements*. In: Cement and Concrete Research 18 (1988), S. 495-502.
- [Lum 96] Lumley, J.S.; Gollop, R.S.; Moir, G.K.; Taylor, H.F.W.: *Degrees of reaction of the slag in some blends with Portland cements*. In: Cement and Concrete Research 26 (1996), S. 159-151.
- [Man 01] Mansfeld, T.: *Untersuchungen zum Quellverhalten von synthetischen Alkali-Kieselsäure-Gelen*. In: Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar (2001), Heft 5/6, S. 130-138.

- [Man 06] Mansfeld, T.: *Untersuchungen zu den Quelltheorien und des Mechanismus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. In: Tagungsbericht 16. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), Weimar, 2006, Band 2, S.477-484.
- [Mar 88] Marsh, B. K., Day, R. L.: *Pozzolanitic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes*. Cement and Concrete Research 18 (1988), Nr. 2, 301-310
- [May 39] Mayer, H.: *Das Wasserglas – Seine Eigenschaften, seine Herstellung und Verwendung*. Vieweg, Braunschweig, 1939.
- [Men 98] Meng, B.: *Neuer Ansatz zur Charakterisierung der Porenstruktur zementgebundener Baustoffe im Hinblick auf die Interpretation von Transportvorgängen*. Forschungsbericht F 526, Institut für Bauforschung Aachen (ibac), 1998.
- [Mul 01] Mullick, A.K.: *Tests for Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete and Preventive Measures – Outline of Current Approach*. In: ICI Journal, October-December 2001, S. 31-36.
- [Nil 83] Nilsson, L.-O.: *Moisture effects on the alkali-silica reaction*. In: Alkalies in Concrete – Research and Practice, Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference, Copenhagen, 1983, S. 201-208.
- [Nis 87] Nishibayashi, S.; Yamura, K.; Matsushita, H.: *A Rapid Method of Determining the Alkali-Aggregate Reaction in Concrete by Autoclave*. In: Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference, Ottawa, 1986, S. 299-303.
- [Nis 89] Nishibayashi, S.; Yamura, K.; Sakata, K.: *Research on the influence of cyclic wetting and drying on alkali-aggregate reaction*. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 1989, S. 617-622.
- [Nix 04] Nixon, P.; Hawthorn, F.; Sims, I.: *Developing an international specification to combat AAR – Proposals of RILEM TC 191-ARP*. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15-19 October 2004, Beijing, China, S. 8-16.
- [Nix 87] Nixon, P.; Page, C.: *Pore solution chemistry and alkali aggregate reaction*. In: Scanlon, J.M. (Ed.), Concrete Durability: Katherine and Bryant Mather International Conference, American Concrete Institute, 1987, ACI SP-100, S. 1833-1862.

- [Nix 96] Nixon, P.; Sims, I.: *Testing aggregates for alkali-reactivity – Report of RILEM TC-106*. In: Materials and Structures 29 (1996), S. 323-334.
- [Obe 81] Oberholster, R.E.; Westra, W.B.: *The effectiveness of mineral admixtures in reducing expansion due to alkali-aggregate reaction with Malmesbury Group aggregates*. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa, 1981, S. 252/31.
- [Obe 86] Oberholster, R.E.; Davies, G.: *An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates*. In: Cement and Concrete Research 16 (1986), S. 181-189.
- [Obe 89] Oberholster, R.E.: *Alkali-aggregate reaction in South Africa: Some recent developments in research*. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 1989, S. 77-82.
- [Ola 86] Ólafsson, H.: *The Effect of Relative Humidity and Temperature on Alkali Expansion of Mortar Bars*. In: Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference, Ottawa, 1986, S. 461-465.
- [Ong 90] Ong, S.: *Study of effects of LiOH, NaOH, and KOH on alkali silica reaction*. Purdue University, Dissertation, 1990.
- [PCA 98] Portland Cement Association (PCA) and American Concrete Pavement Association (ACPA): *Guide Specification for Concrete Subject to Alkali-Silica Reactions*. IS 415, Portland Cement Association, Skokie, 1998.
- [Ped 04] Pedersen, B.M.: *Alkali-reactive and inert fillers in concrete – Rheology of fresh mixtures and expansive reactions*. Norwegian University of Science and Technology, Dissertation, Trondheim, 2004.
- [Phi 04] Philipp, O.; Eifert, K.: *Bestimmung der Alkalireaktivität von Kiesen und Splitten für die Betonherstellung*. In: Betonwerk + Fertigerteiltechnik 70 (2004), Heft 10, S. 6-19.
- [Pik 60] Pike, R.G., Hubbard, D., Newman, E.S.: *Binary Silicat Glasses in the Study of Alkali-Aggregate Reaction*. In: Highway Research Bulletin No. 275 (1960), S. 39-44.
- [Poo 92] Poole, A.B.: *Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete*. In: The Alkali-silica reaction in concrete, R.N. Swamy (ed.), Blackie and Son Ltd, 1992.

- [Pow 46] Powers, T.C.; Brownyard, T.L.: *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*. In: Proceedings of the American Concrete Institute 43 (1946/1947), S. 101-132.
- [Pow 55] Powers, T.C.; Steinour, H.H.: *An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction : Part 1: The Chemical reactions and mechanism of Expansion*. In: ACI Journal 26 (1955) 6, S. 497-516
- [Pow 55a] Powers, T.C.; Steinour, H.H.: *An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction : Part 2: A hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete*. In: ACI Journal 26 (1955) 8, S. 785-812
- [Pre 97] Prezzi, M.; Monteiro, P.J.M.; Sposito, G.: *The Alkali-Silica Reaction, Part I: Use of the Double-Layer Theory to Explain the Behaviour of Reaction-Product Gels*. In: ACI Materials Journal 94 (1997), S. 10-17.
- [Put 85] Putterill, K.E.; Oberholster, R.E.: *Investigation of different variables that influence the expansion of concrete caused by alkali-aggregate reaction under natural environmental conditions*. CSIR Research Report BRR 626, National Building Research Institute of the Council for Scientific and Industrial Research (Publisher), Pretoria, 1985.
- [Ran 92] Ranc, R. ; Debray, L.: *Reference tests methods an a performance criterion for concrete structures*. In: The 9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, 1992, Conference Papers, Vol. 2, S. 824-831.
- [Ran 94] Ranc, R; Isabelle, H.; Clément, J.Y; Sorrentino, D.: *Limits of Application of the ASTM C 227 Mortar Bar Test. Comparison with Two Other Standards on Alkali Aggregate Reactivity*. In: Cement, Concrete and Aggregates 16 (1994), No. 1, S. 63-72.
- [Reg 89] Regourd-Moranville, M.: *Products of reaction and petrographic examination*. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 1989, S. 445-456.
- [Reh 77] Rehm, G.; Diem, P.; Zimbelmann, R.: *Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 283, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1977.
- [Res 00] Reschke, T.: *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton*. Verein Deutscher Zementwerke – VDZ (Hrsg.), Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 62, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 2000.

- [Ril 00] RILEM-Recommendation: A: TC 106-2 – *Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – The ultra-accelerated mortar-bar test.* B: TC 106-3 – *Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Method for aggregate combinations using concrete prisms.* In: *Materials and Structures* 33 (2000), S. 283-293.
- [Riv 03] Rivard, P.; Bérubé, M.-A.; Ollivier, J.-P.; Ballivy, G: *Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity.* In: *Cement and Concrete Research* 33 (2003), S. 1147-1153.
- [Rod 01] Rodrigues, F.A.; Monteiro, P.J.M.: Sposito, G.: *The alkali-silica reaction – The effect of monovalent and bivalent cations on the surface charge of Opal.* In: *Cement and Concrete Research* 31 (2001), S. 1549-1552.
- [Rod 99] Rodrigues, F.A.; Monteiro, P.J.M.: Sposito, G.: *The alkali-silica reaction – The surface charge density of silica and its effect on expansive pressure.* In: *Cement and Concrete Research* 29 (1999), S. 527-530.
- [Rog 00] Rogers, C.A.; Lane, B.; Hooton, D.: *Outdoor exposure for validating the effectiveness of preventive measures for alkali-silica reaction.* In: *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete – Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference, Québec City, June 2000*, S. 743-752.
- [Rog 89] Rogers, C.A.; Hooton, R.D.: *Leaching of Alkalies in Alkali-Aggregate Reaction Testing.* In: *Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, 1989*, S. 327-332.
- [Rom 78] Romberg, H.: *Zementsteinporen und Betoneigenschaften.* In: *Beton-Informationen* 18 (1978), Nr. 5, S. 50-55.
- [Rou 96] Le Roux, Andre ; Godart, Bruno: *Evolution of AAR preventive measures adopted in France.* In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, A. Shayan (ed.), Melbourne, 1996*, S. 892-897.
- [Sch 04] Schäfer, E.: *Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins.* Verein Deutscher Zementwerke – VDZ (Hrsg.), Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 69, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 2006.

- [Schm 06] Schmidt, K.; Hilbig, H.; Heinz, D.: *AKR in Betonen mit Zusatzstoffen – Einfluss der Porenlösungszusammensetzung auf die Schädigung*. In Tagungsbericht 16. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), Weimar, 2006, Band 2, S. 443-452.
- [Scho 06] Scholz, Y.; Hüniger, K.-J.: *Untersuchungen zur Vermeidung von Betonschädigungen infolge AKR durch Zugabe spezieller neuartiger Zusatzstoffe*. In: Tagungsbericht 16. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), Weimar, 2006, Band 2, S. 485-492.
- [Sel 87] Sellevold, E.J.; Nielsen, T.: *Condensed silica fume in concrete: a world review*. In: Supplementary Cementing Materials (V.M. Malhotra (Ed.)), Minister of Supply and Services, Canada, 1987, S. 167-243.
- [Sey 05] Seyfarth, K.; Giebson, C.: *Beurteilung eines AKR-Schädigungspotentials von Betonen mittels Klimawechselagerung*. In: Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Sonderheft 2, S. 189-192
- [Sha 92] Shayan, A.: *Prediction of Alkali Reactivity Potential of Some Australian Aggregates and Correlation with Service Performance*. In: ACI Materials Journal 89 (1992), No.1, S. 13-23.
- [Sha 96] Shayan, A.; Diggins, R.; Ivanusec, I.: *Long-term effectiveness of fly ash in preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete*. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, A. Shayan (ed.), Melbourne, 1996, S. 538-545.
- [She 00] Shehata, M.H.; Thomas, M.D.A.: *The effects of silica fume and fly ash hydration products on the chemistry of the pore solution and portlandite consumption*. In: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete – Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference, Québec City, June 2000, S. 753-762.
- [She 99] Shehata, M.H.; Thomas, M.D.A.; Bleszynski, R.F.: *The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes*. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), S. 1915-1920.
- [Sib 98] Sibbick, R.G.; Page, C.L.: *Mechanisms affecting the development of alkali-silica reaction in hardened concretes exposed to saline environments*. In: Magazine of Concrete Research 50 (1998), Heft 2, S. 147-159.

- [Sie 00] Siebel, E.; Sylla, H.-M.; Bokern, J.: *Einfluss von puzzolanischen Betonzusatzstoffen auf die Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. In: Tagungsbericht 14. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), Weimar, 2000, Band 1, S. 959-967.
- [Sie 01] Siebel, E.; Bokern, J.; Sylla, H.-M.: *Entwicklung neuer NA-Zemente auf Basis von Zementen mit Hüttensand als Hauptbestandteil*. In: beton 51 (2001), S. 693-697 (Teil 1) und beton 52 (2002), S. 47-50 (Teil 2).
- [Sie 06] Siebel, E.; Böhm, M.; Borchers, I.; Bokern, J.; Müller, C.; Schäfer, E.: *AKR-Prüfverfahren – Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz*. In: Tagungsbericht 16. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), Weimar, 2006, Band 2, S. 373-388.
- [Sie 97] Siebel, E.; Reschke, T.: *Alkali-Reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer – Untersuchungen an Laborbetonen*. In: beton 46 (1996), Heft 12, S. 740-744 und beton 47 (1997), Heft 1, S. 26-32.
- [Sie 97a] Siebel, E.; Reschke, T.; Sylla, H.-M.: *Alkali-Reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer – Untersuchungen an geschädigten Bauwerken*. In: beton 46 (1996), Heft 5, S. 298-301 und Heft 6, S. 366-370.
- [Sim 03] Sims, I.; Nixon, P.: *RILEM Recommended Test Method AAR-0: Detection of Alkali-Reactivity Potential in Concrete – Outline guide to the use of RILEM methods in assessments of aggregates for potential alkali-reactivity*. In: Materials and Structures 36 (2003), S. 472-479.
- [Sim 03a] Sims, I.; Nixon, P.: *RILEM Recommended Test Method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method*. In: Materials and Structures 36 (2003), S. 480-496.
- [Sim 04] Sims, I.: *International collaboration to control alkali-aggregate reaction: The successful progress of RILEM TC 106 and TC 191-ARP*. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15-19 October 2004, Beijing, China, S. 41-50.
- [Sim 92] Sims, I.; Higgins, D.: *The use of ggbs to prevent ASR expansion caused by UK flint aggregates*. In: The 9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, 1992, Conference Papers, Vol. 2, S. 988-1000.

- [Smo 74] Smolczyk, H.G.: *Slag cements and alkali reactive aggregates*. In: Proceedings, The VI International Congress on the Chemistry of Cement, Supplementary paper, Section III, Moscow, 1974.
- [Smo 76] Smolczyk, H.G.; Romberg, H.: *Der Einfluß der Nachbehandlung und der Lagerung auf die Nacherhärtung und Porenverteilung von Beton*. In: Tonindustrie-Zeitung 100 (1976), Nr. 10, S. 349-357 und Nr. 11, S. 381-390.
- [Sor 89] Sorrentino, D.; Ranc, R.; Cariou, B.: *Methodology of an Industrial Research Laboratory to Assess the Reactivity of Aggregates, Focus on Reproducibility Problems*. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, 1989, S. 307-312.
- [Spr 73] Sprung, S.: *Einfluss von Zement und Zusätzen auf die Alkalireaktion*. In: Verein Deutscher Zementwerke – VDZ (Hrsg.), Schriftenreihe der Zementindustrie 40, Vorbeugende Maßnahmen gegen die Alkalireaktion in Beton, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1973.
- [Spr 97] Sprung, S.; Sylla, H.-M.: *Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit und Wasseraufnahme von Betonzuschlagstoffen*. In: ZKG International 50 (1997), S. 63-74.
- [Spr 98] Sprung, S.; Sylla, H.-M.: *Ablauf der Alkali/Kieselsäure-Reaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen*. In: ZKG International 51 (1998), S. 334-345.
- [Sta 40] Stanton, T.E.: *Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate*. Proceedings, American Society of Civil Engineers 66 (1940), S. 1781-1811.
- [Sta 42] Stanton, T.E.; Portep, O.J.; Meder, L.C.; Nicol, A.: *California experience with the expansion of concrete through reaction between cement and aggregate*. In: ACI Journal 13 (1942), S. 209-236.
- [Stad 91] Stark, D.: *The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity*. In: Durability of Concrete (V.M. Malhotra (Ed.)), Second International Conference, Montreal, 1991, S. 973-987.
- [Stad 93] Stark, D.; Diamond, S.: *Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity*. National Research Council (Hrsg.) – Strategic Highway Research Program (SHRP), SHRP-C-343, National Academy of Sciences, Washington, 1993.
- [Staj 01] Stark, J.; Wicht, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton*. F.-A.-Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.), Birkhäuser, Berlin, 2001.

- [Staj 06] Stark, J.; Seyfarth, K.; Giebson, C.: *Beurteilung einer Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen und AKR-Performanc-Prüfung Beton*. In: Tagungsbericht 16. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), Weimar, 2006, Band 2, S. 399-426.
- [Staj 06a] Stark, J.: *Beurteilung der Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen und AKR Performance-Prüfung Beton*. Vortrag bei der 16. Internationale Baustofftagung, ibausil am 22.09.2006, Weimar.
- [Str 00] Struble, L.J.; Pade, C.: *Proposed New Test Procedure for Measuring Alkali-Silica Expansion Produced by Hydraulic Cement*. In: Cement, Concrete and Aggregates 22 (2000), No. 1, S. 48-54.
- [Str 79] Struble L.J.: *Swell and other properties of synthetic alkali-silica gels*. MS thesis, School of Civil Engineering, Purdue University, 1979.
- [Str 87] Struble L.J.: *Swell and other properties of synthetic alkali-silica gels*. Ph.D. thesis, Purdue University, 1987.
- [Swa 92] Swamy, R.N.: *Role and effectiveness of mineral admixtures in relation to alkali-silica reaction*. In: The Alkali-silica reaction in concrete, R.N. Swamy (ed.), Blackie and Son Ltd, 1992, S. 96-121.
- [Swa 92a] Swamy, R.N.: *Testing for alkali-silica reaction*. In: The Alkali-silica reaction in concrete, R.N. Swamy (ed.), Blackie and Son Ltd, 1992, S. 51-94.
- [Syb 93] Sybertz, F.: *Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 434, Beuth, Berlin, 1995.
- [Syl 02] Sylla, H.-M.: *Einfluss des Hüttensandes und anderer Bestandteile auf die Alkalibindung in Beton*. Schlussbericht zum AiF-Vorhaben Nr. 12156 N, unveröffentlicht.
- [Syl 88] Sylla, H.-M.: *Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung*. In: beton 38 (1988), S. 449-454.
- [Tan 83] Tang, M.S.; Han, S.F.; Zhen, S.H.: *A Rapid Method for Identification of Alkali-Reactivity of Aggregate*. In: Cement and Concrete Research 13 (1983), S. 417-422.
- [Tha 04] Thalmann, C.; Pralong, J.; Burdin, J.; Schmid, H.; Weiss, R.: *AAR-prevention for the world's longest tunnels – Alptransit Gotthard and Lötschberg in Switzerland*. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15-19 October 2004, Beijing, China, S. 651-658.

- [Tho 06] Thomas, M.D.A.; Fournier, B.; Folliard, K.; Ideker, J; Shehata, M.: *Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete*. In: Cement and Concrete Research 36 (2006), S. 1842-1856.
- [Tho 92] Thomas, M.D.A.; Blackwell, B.Q.; Pettifer, K.: *Suppression of damage from alkali silica reaction by fly ash in concrete dams*. In: The 9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, 1992, Conference Papers, Vol. 2, S. 1059-1066.
- [Tho 95] Thomas, M.D.A.: *The Role of Fly Ash and Slag Alkalies in Alkali-Silica Reactions in Concrete*. In: CANMET/ACI International Workshop on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Dartmouth, 1995, S. 181-204.
- [Tho 96] Thomas, M.D.A.: *Review of the effect of fly ash and slag on alkali-aggregate reaction in concrete*. Construction Research Communications Ltd., Watford, 1996.
- [Tho 96a] Thomas, M.D.A.; Blackwell B.Q.: *Summary of BRE research on the effect of fly ash on alkali-silica reaction in concrete*. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, A. Shayan (ed.), Melbourne, 1996, S. 554-561.
- [Tho 98] Thomas, M.D.A.: *The role of calcium in alkali-silica reaction*. In: Materials Science of Concrete: The Sidney Diamond Symposium, Hrsg.: Cohen, M.; Mindess, S.; Skalny, J.; American Ceramic Society, 30.08.-03.09.1998, Honolulu, Hawaii, S. 325-338.
- [Tou 01] Touma, W.E.; Fowler, D.F.; Carrasquillo, R.L.: *Alkali-silica reaction in portland cement concrete : Testing methods and mitigation alternatives*. International Center for Aggregates Research, ICAR, Research Report ICAR 301-1F, Austin, 2001.
- [Uch 87] Uchikawa, H; Uchida, S.; Ogawa, K.: *Influence of Character of Blending Component on the Diffusion of Na and Cl ions in Hardened Blended Cement Paste*. In: Journal of Research of the Onoda Cement Company 39 (1987), Heft 116, S. 19-28.
- [Vai 52] Vail J.G.: *Soluble Silicates – Their Properties and Use, Volume 1 : Chemistry*. American Chemical Society Monograph Series, Reinhold Publishing, New York, 1952.
- [VDZ 02] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): *Zement-Taschenbuch 2002*, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2002.

- [VDZ 73] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): *Vorbeugende Maßnahmen gegen Alkalireaktion im Beton*. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 40, Beton-Verlag, 1973.
- [VDZ 75] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): *Tätigkeitsbericht 1972-74*. Düsseldorf, Verein Deutscher Zementwerke, 1975
- [Viv 47] Vivian H.E.: *Studies in cement-aggregate reaction: part VII*. In: Journal of the Council for Scientific and Industrial Research 20 (1947), S. 585-594.
- [Viv 50] Vivian H.E.: *Studies in cement-aggregate reaction: parts IX-XV*. Bulletin No. 256, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne, 1950.
- [Viv 51] Vivian H.E.: *Studies in cement-aggregate reaction: XVII, Some effects of temperature on mortar expansion*. In: Australian Journal of Applied Science 2 (1951), Heft 1, S. 114-122.
- [Wan 04] Wang, H.; Farzam, H.; Bryan, S.: *ASR – a review of mechanisms and proper prevention measures*. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. 1, 15-19 October 2004, Beijing, China, S. 682-687.
- [Wan 91] Wang, H.; Gillott, J.E.: *Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide*. In: Cement and Concrete Research 21 (1991), S. 647-654.
- [Wie 00] Wieker, W.; Hübert, C.; Heidemann, D.: *Zur Reaktion von Alkaliverbindungen mit Kieselsäure und Silicaten im Hinblick auf betonschädigende Dehnungsreaktionen*. In: Tagungsbericht 14. Internationale Baustofftagung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), Weimar, 2000, Band 1, S. 911-929.
- [Wie 96] Wieker, W.; Hübert, C.; Ebert, R.: *Contribution to the Chemical Reaction Mechanism of the Alkali-Aggregate Reaction*. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, A. Shayan (ed.), Melbourne, 1996, S. 919-926.
- [Wie 99] Wieker, W.; Hübert, C.; Ebert, R.; Heidemann, D.: *Bedeutung der relativen Feuchtigkeit für die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) an einem chemischen Modell für diese Reaktion*. In: DGZfP-Bereichsband BB69-CD Poster 3, Feuchttag '99, Umwelt - Messverfahren - Anwendungen, BAM, Berlin, 1999.

- [Wig 95] Wigum, B.J.: *Alkali-Aggregate Reactions in Concrete – Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks*. University of Trondheim, Dissertation, 1995.
- [Wil 94] Wilson, M.; Cabrera, J.G.; Zou, Y.: *The process and mechanism of alkali-silica reaction using fused silica as the reactive aggregate*. In: *Advances in Cement Research* 23 (1994), Heft 6, S. 117-125.
- [Wis 61] Wischers, G.: *Physikalische Eigenschaften des Zementsteins*. In: *Beton* 11 (1961), Nr. 7, S. 481-486
- [Zha 99] Zhang, C.; Wang, A.; Zhang, N.: *Influence of Dimension of Test Specimen on Alkali-Aggregate Reactive Expansion*. In: *ACI Materials Journal* 96 (1999), No. 2, S. 204-207.

## ANHANG A – Tafeln

Tafel A-1:	Kennwerte der Zemente, des Hüttensand (S), der Flugasche (V) und des Silikastaub (D).....	197
Tafel A-2:	Frisch- und Festbetoneigenschaften.....	198
Tafel A-3:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B1 .....	199
Tafel A-4:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B2 .....	199
Tafel A-5:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B3 .....	200
Tafel A-6:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B4 .....	200
Tafel A-7:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B5 .....	201
Tafel A-8:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B6 .....	201
Tafel A-9:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 4 x 4 x 16 cm <sup>3</sup> .....	202
Tafel A-10:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 7,5 x 7,5x 28 cm <sup>3</sup> .....	202
Tafel A-11:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 10 x 10 x 10 cm <sup>3</sup> .....	203
Tafel A-12:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 10 x 10 x 28 cm <sup>3</sup> .....	203
Tafel A-13:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 15 x 15 x 28 cm <sup>3</sup> .....	204
Tafel A-14:	Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B8 .....	204

Tafel A -15: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B9 .....	205
Tafel A-16: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B10 .....	205
Tafel A-17: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B11 .....	206
Tafel A-18: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B12 .....	207
Tafel A-19: Abschätzung des verbleibenden Kaliumanteils $K_{pot}$ für Probekörper gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 bei Lagerung SAL und NK40.....	207
Tafel A-20: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B8 .....	208
Tafel A-21: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B9 .....	209
Tafel A-22: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B10 .....	210
Tafel A-23: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B11 .....	211
Tafel A-24: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B12 .....	212
Tafel A-25: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B13 .....	213
Tafel A-26: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B14 .....	214
Tafel A-27: Ergebnis der STA-Untersuchungen an Zementsteinen, CH-Gehalt in Abhängigkeit vom Alter und der Lagerung (Temperaturregime).....	215
Tafel A-28: Chemische Zusammensetzung der gemahlenden Stückenwassergläser (Angaben des Herstellers in [Cog 04]) .....	215
Tafel A-29: Maximale Dehnung, Zeitpunkt der Erstschädigung und weitere Beobachtungen während der Mörtelprimentests .....	216

Tafel A-1: Kennwerte der Zemente, des Hüttensand (S), der Flugasche (V) und des Silikastaub (D)

Kennwert	Einheit	CEM I (1,3)	CEM I-NA	S	V	D <sup>1)</sup>	
Physikalische Eigenschaften							
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	3,07	3,12	2,91	2,25	2,07	
Spez. Oberfläche (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	3875	3355	3820	3890	200000 <sup>2)</sup>	
Wasseranspruch	M.-%	30,5	27,0	-	-	-	
Erstarren Beginn	Min	240	165	-	-	-	
Raubest. (Le Chatelier)	mm	1,0	0,0	-	-	-	
Druckfestigkeit	2d	MPa	25,8	20,1	-	-	-
	28d		44,9	60,7	-	-	-
Chemisch-mineralogische Eigenschaften							
Oxide (glv.-haltig)	SO <sub>3</sub>	M.-%	3,31	3,13	0,09	0,40	0,13
	SiO <sub>2</sub>		20,07	22,49	34,78	47,07	97,45
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5,47	3,68	12,04	30,51	0,17
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3,08	1,36	0,32	8,23	0,07
	CaO		60,91	65,23	42,53	4,46	0,01
	MgO		2,83	0,78	7,60	1,33	0,19
	K <sub>2</sub> O		1,55	0,51	0,43	1,63	0,39
	Na <sub>2</sub> O		0,27	0,20	0,32	0,60	0,12
	Na <sub>2</sub> O <sub>Äq</sub>		1,29	0,54	0,60	1,67	0,38
Glühverlust (gesamt)	M.-%	2,00	2,21	0,24	3,47	1,26	
Phasen nach Bogue (glv.-frei)	C <sub>3</sub> S	M.-%	50,58	62,32	-	-	-
	C <sub>2</sub> S		20,58	18,95	-	-	-
	C <sub>3</sub> A		9,47	7,61	-	-	-
	C <sub>4</sub> AF		9,56	4,23	-	-	-
Glasanteil [Sch 04] <sup>3)</sup>	%	-	-	> 99	68	-	
1) getrockneter Rückstand der verwendeten Slurry							
2) bestimmt nach BET, Herstellerangabe							
3) Hüttensand S1 und Flugasche V1							

Tafel A-2: Frisch- und Festbetoneigenschaften

Beton	Frischbeton				Festbeton	
	Ausbreitmaß $d_{10}$	Verdichtungsmaß $c_{10}$	Rohdichte $\rho_R$	Luftgehalt LP	Rohdichte $\rho_{R,28}$	Festigkeit $f_{c,28}$
Nr.	mm	-	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	MPa
B1	-	1,37	2420	1,5	2400	50,0
B2	450	-	2350	1,1	2350	37,0
B3	-	1,59	2460	2,2	2430	62,0
B4	390	-	2360	1,2	2350	46,0
B5	-	1,54	2450	0,9	2420	52,5
B6	-	1,41	2380	2,6	2370	48,5
B7	-	1,36	2420	1,2	2400	50,5
B8 <sup>1)</sup>	650	-	2280	0,7	2260	34,0
B9	700	-	2280	0,3	2270	47,0
B10 <sup>1)</sup>	670	-	2280	1,2	2270	37,5
B11 <sup>1)</sup>	660	-	2260	0,5	2220	28,0
B12 <sup>1)</sup>	430	-	2260	1,5	2240	49,5
B13 <sup>1)</sup>	620	-	2270	1,2	2230	35,0
B14 <sup>1)</sup>	680	-	2280	0,4	2270	30,5
1) jeweils Mittelwerte von 2 Betonen unterschiedlichen Herstelldatums						

Tafel A-3: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B1

<b>B1</b>	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,45	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	13,2	0,54	88	240	26	240	95
28	7,8	0,32	92	379	37	618	88
56	7,3	0,30	93	249	24	867	83
91	4,5	0,18	95	218	21	1085	79
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	12,8	0,53	88	440	52	440	92
28	14,0	0,58	87	592	93	1032	80
56	17,3	0,71	84	561	88	1593	69
91	18,5	0,76	83	443	118	2036	61

Tafel A-4: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B2

<b>B2</b>	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,55	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	15,5	0,65	90	226	29	226	96
28	3,8	0,16	97	403	43	630	88
56	2,4	0,10	98	269	27	899	83
91	-0,3	-0,01	100	219	24	1117	78
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	14,5	0,61	90	386	47	386	93
28	14,0	0,59	90	613	94	999	81
56	18,2	0,76	88	688	91	1688	67
91	18,9	0,79	88	485	125	2173	58

Tafel A-5: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B3

B3	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,35	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	12,7	0,51	81	301	33	301	94
28	8,8	0,36	86	318	28	619	88
56	8,2	0,33	87	213	17	832	84
91	7,7	0,31	87	214	15	1046	80
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	13,8	0,55	79	534	58	534	90
28	16,4	0,65	76	590	86	1124	78
56	18,0	0,72	75	444	79	1568	70
91	20,3	0,81	72	402	115	1970	62

Tafel A-6: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B4

B4	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		500	w/z	0,45	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	16,5	0,69	88	239	28	239	96
28	9,5	0,40	92	437	42	676	90
56	4,2	0,18	97	300	28	976	85
91	2,7	0,11	98	288	24	1264	80
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	16,5	0,69	88	519	61	519	92
28	18,8	0,78	86	609	109	1128	83
56	21,0	0,88	85	610	107	1738	73
91	22,5	0,94	84	546	162	2284	65

Tafel A-7: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B5

B5	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		300	w/z	0,45	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	11,6	0,47	86	216	29	216	94
28	6,4	0,26	92	316	30	532	86
56	5,1	0,21	93	217	18	749	81
91	3,8	0,15	95	187	16	937	76
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	12,9	0,53	84	408	53	408	90
28	14,8	0,60	83	587	90	995	74
56	16,6	0,67	81	431	87	1427	63
91	17,8	0,73	80	365	120	1791	54

Tafel A-8: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B6

B6	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,45	Sieblinie	B/C16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	15,8	0,66	86	346	46	346	93
28	7,2	0,30	93	358	31	705	86
56	4,3	0,18	96	212	24	917	82
91	0,5	0,02	100	183	19	1100	79
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	15,1	0,63	86	647	47	647	88
28	17,8	0,74	84	703	94	1350	74
56	16,5	0,68	85	471	91	1821	65
91	20,3	0,84	82	135	125	1956	62

Tafel A-9: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>

B7	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,45	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		16	B <sub>nom</sub> [cm]	4	H <sub>nom</sub> [cm]	4
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>k</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	4,9	0,78	83	184	25	184	86
28	1,3	0,21	95	102	12	286	78
56	0,4	0,06	98	83	9	369	72
91	0,3	0,05	99	73	9	442	67
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	3,7	0,57	87	257	36	257	81
28	3,9	0,61	86	269	54	526	60
56	3,7	0,58	87	126	41	652	51
91	4,9	0,76	83	163	65	815	39

Tafel A-10: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 7,5 x 7,5x 28 cm<sup>3</sup>

B7	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,45	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		28	B <sub>nom</sub> [cm]	7,5	H <sub>nom</sub> [cm]	7,5
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>k</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	23,0	0,59	86	467	52	467	94
28	9,9	0,26	94	346	40	813	90
56	7,4	0,19	95	218	31	1032	87
91	7,6	0,20	95	304	33	1336	84
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	21,8	0,56	87	770	91	770	91
28	23,5	0,61	86	1057	171	1827	78
56	23,8	0,62	86	669	127	2496	69
91	27,4	0,71	84	673	168	3168	61
Analysewerte Lagerung Ü60 (pro Probekörper)							
7	-3,8	-0,10	103	166	17	166	98
28	-2,1	-0,05	101	533	65	698	91
56	-4,4	-0,11	103	718	89	1417	83
91	-3,4	-0,09	102	589	70	2005	75

Tafel A-11: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup>

B7	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,45	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	14,8	0,61	86	248	34	248	95
28	6,3	0,26	94	316	31	565	89
56	5,5	0,23	94	196	22	761	85
91	6,3	0,26	94	190	21	950	82
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	16,5	0,67	85	415	55	415	92
28	19,2	0,78	83	615	112	1030	80
56	19,3	0,79	83	390	98	1420	73
91	21,4	0,87	81	416	143	1836	65

Tafel A-12: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 10 x 10 x 28 cm<sup>3</sup>

B7	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,45	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		28	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	36,2	0,54	88	399	53	399	97
28	18,6	0,28	93	525	58	924	94
56	15,1	0,22	95	401	43	1324	91
91	16,8	0,25	94	432	48	1756	88
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	39,8	0,59	87	791	98	791	95
28	45,0	0,66	85	1426	229	2217	85
56	47,6	0,70	85	942	163	3159	78
91	50,9	0,75	84	1021	203	4180	71

Tafel A-13: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B7, Prisma 15 x 15 x 28 cm<sup>3</sup>

B7	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	w/z	0,45	Sieblinie	A/B16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		28	B <sub>nom</sub> [cm]	15	H <sub>nom</sub> [cm]	15
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	64,0	0,39	90	414	45	414	99
28	36,0	0,22	94	931	139	1345	96
56	35,0	0,22	94	862	97	2206	93
91	36,0	0,25	94	838	94	3044	91
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	57,0	0,41	91	1153	133	1153	96
28	77,0	0,56	88	2435	387	3588	89
56	85,0	0,62	87	1523	290	5111	84
91	97,0	0,70	86	1592	572	6703	79

Tafel A-14: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B8

B8	Zement		CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		500	w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	22,5	0,99	88	250	24	250	96
28	6,0	0,26	97	391	44	640	90
56	3,6	0,16	98	265	31	905	86
91	0,7	0,02	100	188	20	1094	83
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	20,6	0,90	89	567	69	567	91
28	23,3	1,03	88	862	157	1430	78
56	23,9	1,05	87	558	116	1987	69
91	23,1	1,01	88	658	160	2645	59
Analysewerte Lagerung Ü60 (pro Probekörper)							
	L <sub>nom</sub> [cm]		14	B <sub>nom</sub> [cm]	7,5	H <sub>nom</sub> [cm]	7,5
7	3,1	0,17	98	137	13	137	97
28	-6,2	-0,35	105	393	53	530	90
56	-7,7	-0,43	106	599	74	1129	78
91	-9,9	-0,55	108	750	95	1879	63

Tafel A -15: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B9

B9	Zement		CEM I-NA	K <sub>2</sub> O [M.-%]	0,51	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,20
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		500	w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	17,2	0,74	90	92	23	92	96
28	2,7	0,12	98	194	50	285	87
56	1,5	0,06	99	125	32	410	81
91	-12,9	-0,26	109	115	33	525	75
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	15,6	0,67	91	250	85	250	88
28	17,8	0,77	90	403	186	652	69
56	19,6	0,85	89	272	165	924	56
91	20,0	0,86	89	236	243	1161	45

Tafel A-16: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B10

B10	Zement		CEM II/A-S	w. Hauptb.	Hüttensand	Anteil [%]	20
	z <sub>CEM I</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]		400	K <sub>2</sub> O <sub>CEM I</sub> [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O <sub>CEM I</sub> [M.-%]	0,26
Betonalter	L <sub>nom</sub> [cm]		10	w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
d	Δm <sub>WA</sub> [g]	WA [%]	V <sub>PL</sub> [%]	B <sub>nom</sub> [cm]	10	H <sub>nom</sub> [cm]	10
				m <sub>K</sub> [mg]	m <sub>Na</sub> [mg]	K <sub>kum</sub> [mg]	K <sub>pot</sub> [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	20,3	0,88	90	353	44	353	93
28	5,3	0,23	97	215	35	568	89
56	5,2	0,23	97	152	22	720	86
91	2,0	0,09	99	140	20	860	83
V <sub>Probe</sub> :V <sub>Eluent</sub> = 1:3							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	14,1	0,62	93	132	19	132	97
28	19,9	0,87	90	458	84	590	89
56	15,9	0,70	92	45	25	635	88
91	26,0	1,14	88	534	264	1169	77
Analysewerte Lagerung Ü60 (pro Probekörper)							
	L <sub>nom</sub> [cm]		14	B <sub>nom</sub> [cm]	7,5	H <sub>nom</sub> [cm]	7,5
7	-3,4	-0,19	103	111	13	111	97
28	-0,4	-0,02	100	257	37	369	91
56	-1,8	-0,10	102	444	60	813	80
91	-2,1	-0,12	102	524	81	1337	67

Tafel A-17: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B11

B11	Zement		CEM II/A-V	w. Hauptb.	Flugasche	Anteil [%]	
	$z_{\text{CEM1}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]		400	$K_2O_{\text{CEM1}}$ [M.-%]	1,56	$Na_2O_{\text{CEM1}}$ [M.-%]	0,26
				w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
Betonalter	$L_{\text{nom}}$ [cm]		10	$B_{\text{nom}}$ [cm]	10	$H_{\text{nom}}$ [cm]	
d	$\Delta m_{\text{WA}}$ [g]	WA [%]	$V_{\text{PL}}$ [%]	$m_K$ [mg]	$m_{\text{Na}}$ [mg]	$K_{\text{kum}}$ [mg]	$K_{\text{pot}}$ [%]
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)							
7	20,5	0,90	90	253	32	253	95
28	-3,5	-0,15	102	401	49	654	87
56	-1,3	-0,06	101	192	28	846	84
91	-2,1	-0,09	101	136	19	982	81
$V_{\text{Probe}}:V_{\text{Eluent}} = 1:3$							
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)							
7	15,3	0,67	92	115	17	115	98
28	20,8	0,91	90	571	106	686	87
56	22,3	0,98	89	176	54	863	83
91	14,5	0,63	93	30	63	893	83
Analysewerte Lagerung Ü60 (pro Probekörper)							
	$L_{\text{nom}}$ [cm]		14	$B_{\text{nom}}$ [cm]	7,5	$H_{\text{nom}}$ [cm]	
7	-2,1	-0,12	102	102	10	102	97
28	-1,9	-0,11	102	115	17	217	95
56	0,1	0,01	100	242	35	459	89
91	0,9	0,05	99	256	44	715	82

Tafel A-18: Wasseraufnahme, Verdünnung, Alkalimengen im Auslaugwasser und verbleibende Kaliummenge im Probekörper, Beton B12

B12	Zement		CEM II/A-D	w. Hauptb.	Silikastaub	Anteil [%]		10
	$z_{CEM I}$ [kg/m <sup>3</sup> ]		450	$K_2O_{CEM I}$ [M.-%]	1,56	$Na_2O_{CEM I}$ [M.-%]	0,26	
				w/z	0,55	Sieblinie	B/C16	
Betonalter	$L_{nom}$ [cm]		10	$B_{nom}$ [cm]	10	$H_{nom}$ [cm]		10
d	$\Delta m_{WA}$ [g]	WA [%]	$V_{pl}$ [%]	$m_K$ [mg]	$m_{Na}$ [mg]	$K_{kum}$ [mg]	$K_{pot}$ [%]	
Analysewerte Lagerung SAL (pro Probekörper)								
7	18,15	0,81	91	213	26	213	96	
28	9,85	0,44	95	295	39	509	91	
56	12,1	0,54	94	157	17	666	89	
91	12,4	0,55	93	117	15	783	87	
$V_{Probe}:V_{Eluent} = 1:3$								
Analysewerte Lagerung NK40 (pro Probekörper)								
7	15,4	0,69	92	204	35	204	96	
28	16,5	0,73	91	164	49	369	94	
56	19,1	0,85	90	146	60	515	91	
91	19,3	0,86	90	65	75	579	90	
Analysewerte Lagerung Ü60 (pro Probekörper)								
	$L_{nom}$ [cm]		14	$B_{nom}$ [cm]	7,5	$H_{nom}$ [cm]		7,5
7	4,4	0,25	96	46	5	46	99	
28	4,8	0,27	96	61	7	107	98	
56	5,5	0,31	96	160	20	267	94	
91	8,1	0,46	94	230	33	497	89	

Tafel A-19: Abschätzung des verbleibenden Kaliumanteils  $K_{pot}$  für Probekörper gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3 bei Lagerung SAL und NK40

Beton mit Zement CEM I (1,3), $z = 400$ kg/m <sup>3</sup> , w/z = 0,45; Sieblinie A/B (Kalkstein)						
Betonalter	$K_{pot}$ in %					
	Gleichung	Lagerung SAL		Gleichung	Lagerung NK40	
		Balken	Würfel		Balken	Würfel
		10 x 10 x 50	30 x 30 x 30		10 x 10 x 50	30 x 30 x 30
[d]	A/V		A/V		A/V	
	0,44	0,20	0,44	0,20		
7	$K_{pot} = -20,5 * A/V + 104$	98	100	$K_{pot} = -16,4 * A/V + 105$	95	100
28	$K_{pot} = -36,6 * A/V + 101$	93	99	$K_{pot} = -22,4 * A/V + 103$	85	94
56	$K_{pot} = -42,1 * A/V + 97$	91	98	$K_{pot} = -27,3 * A/V + 103$	78	89
91	$K_{pot} = -51,0 * A/V + 95$	88	96	$K_{pot} = -31,0 * A/V + 102$	73	85

Tafel A-20: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B8

B8	Zement	CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z [kg/m³]	500	w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
	Alkaliempfindliche Gesteinskörnung			keine (100 % reiner Kalkstein)		
Betonalter	c <sub>cal</sub> in mmol/l				pH	pH <sub>cal</sub>
d	K	Na	Na+K	SO <sub>4</sub>		
Analysewerte Lagerung SAL						
1	363	56	419	3	-	13,62
3	344	59	403	7	-	13,61
7	435	79	514	7	-	13,71
28	480	92	572	-	-	13,76
56	447	83	530	-	-	13,72
91	429	79	507	-	13,72	13,71
Analysewerte Lagerung SAL-K						
1	363	56	419	3	-	13,62
3	453	77	530	6	-	13,72
7	530	91	621	10	-	13,79
28	598	106	704	-	-	13,85
56	608	106	714	-	-	13,85
91	604	97	701	-	13,84	13,85
Analysewerte Lagerung NK40						
1	363	56	419	3	-	13,62
3	404	65	468	13	-	13,67
7	507	93	600	24	-	13,78
28	459	97	557	-	-	13,75
56	345	75	420	-	-	-
91	278	64	342	-	13,55	13,53
Analysewerte Lagerung NK40-K						
1	363	56	419	3	-	13,62
3	513	88	600	16	-	13,78
7	571	98	669	24	-	13,83
28	598	116	714	-	-	13,85
56	606	113	720	-	-	-
91	593	108	701	-	13,83	13,85
Analysewerte Lagerung Ü60						
1	363	56	419	3	-	13,62
3	433	80	514	66	-	13,58
7	478	87	565	90	-	13,58
28	519	101	620	93	-	13,64
56	424	92	516	70	13,58	13,57
91	338	82	420	55	-	13,49
Analysewerte Lagerung Ü60-K						
1	363	56	419	3	-	13,62
3	410	73	484	67	13,69	13,54
7	532	95	628	102	13,69	13,63
28	535	100	635	103	13,64	13,63
56 <sup>1)</sup>	544	112	656	108	13,64	13,64
91	538	113	651	123	13,61	13,61

1) Mittelwert aus 2 Analysen

Tafel A-21: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B9

B9	Zement	CEM I-NA	K <sub>2</sub> O [M.-%]	0,54	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,18
	z [kg/m <sup>3</sup> ]	500	w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
	Alkaliempfindliche Gesteinskörnung			keine (100 % reiner Kalkstein)		
Betonalter	c <sub>cat</sub> in mmol/l				pH	pH <sub>cat</sub>
d	K	Na	Na+K	SO <sub>4</sub>		
Analysewerte Lagerung SAL						
1	132	38	170	32	-	13,2
3	106	36	142	3	-	13,2
7	117	53	170	1	-	13,2
28	194	93	287	3	-	13,5
56	-	-	-	-	-	-
91	189	89	278	-	-	13,4
Analysewerte Lagerung SAL-K						
1	132	38	170	32	-	13,23
3	133	48	181	1	-	13,26
7	163	71	235	2	-	13,37
28	251	109	360	3	-	13,56
56	-	-	-	-	-	-
91	243	124	367	-	-	13,6
Analysewerte Lagerung NK40						
1	132	38	170	32	-	13,23
3	114	52	165	3	-	13,22
7	112	55	168	2	-	13,22
28	138	81	219	3	-	13,34
56	-	-	-	-	-	-
91	136	81	217	-	-	13,3
Analysewerte Lagerung NK40-K						
1	132,38	38	170	32	-	13,23
3	111,88	51	163	3	-	13,21
7	132,11	61	193	3	-	13,29
28	184,16	93	278	5	-	13,44
56	-	-	-	-	-	-
91	210,33	100	311	-	-	13,5

Tafel A-22: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B10

B10	Zement	CEM II/A-S	w. Hauptb.	Hüttensand	Anteil [%]	20
	z [kg/m³]	500	K <sub>2</sub> O <sub>CEM1</sub> [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O <sub>CEM1</sub> [M.]	0,26
			K <sub>2</sub> O <sub>s</sub> [M.-%]	0,44	Na <sub>2</sub> O <sub>s</sub> [M.-%]	0,31
			w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
Alkaliempfindliche Gesteinskörnung			keine (100 % reiner Kalkstein)			
Betonalter	c <sub>cal</sub> in mmol/l				pH	pH <sub>cal</sub>
d	K	Na	Na+K	SO <sub>4</sub>		
Analysewerte Lagerung SAL						
1	355	59	414	-	-	13,62
3	373	69	442	-	-	13,65
7	313	65	378	-	-	13,58
28	325	68	393	-	-	13,59
56	330	72	402	-	-	13,60
91	368	86	454	-	-	13,66
Analysewerte Lagerung SAL-K						
1	355	59	414	-	-	13,62
3	420	71	492	-	-	13,69
7	438	80	517	-	-	13,71
28	421	86	507	-	-	13,71
56 <sup>1)</sup>	444	92	536	-	-	13,73
91	482	103	585	-	-	13,77
1) Mittelwert aus 2 Analysen						
Analysewerte Lagerung NK40						
1	355	59	414	-	-	13,62
3	398	80	478	-	-	13,68
7	334	73	407	-	-	13,61
28	272	73	344	-	-	13,54
56 <sup>1)</sup>	313	82	395	-	-	13,60
91	247	72	319	-	-	13,50
1) ggf. zu hoher Wert durch temporäre Austrocknung infolge eines defekten Defensors						
Analysewerte Lagerung NK40-K						
1	355	59	414	-	-	13,62
3	406	85	491	-	-	13,69
7	466	98	564	-	-	13,75
28	455	98	552	-	-	13,74
56 <sup>1)</sup>	461	106	567	-	-	13,75
91	501	118	618	-	-	13,79
1) Mittelwert aus 2 Analysen						
Analysewerte Lagerung Ü60						
1	355	59	414	-	-	-
3	460	115	575	99	-	13,58
7	403	110	513	91	-	13,52
28	369	95	463	40	-	13,58
56	337	97	434	39	-	13,55
91	267	78	345	27	-	13,46
Analysewerte Lagerung Ü60-K						
1	355	59	414	-	-	-
3	434	110	544	87	-	13,57
7	331	88	419	71	-	13,44
28	413	105	518	41	-	13,64
56	454	128	582	57	-	13,67
91	467	123	590	60	-	13,67

Tafel A-23: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B11

B11	Zement	CEM II/A-V	w. Hauptb.	Flugasche	Anteil [%]	20
	z [kg/m³]	500	K <sub>2</sub> O <sub>CEM1</sub> [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O <sub>CEM1</sub> [M.-%]	0,26
			K <sub>2</sub> O <sub>v</sub> [M.-%]	1,63	Na <sub>2</sub> O <sub>v</sub> [M.-%]	0,60
			w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
Alkaliempfindliche Gesteinskörnung			keine (100 % reiner Kalkstein)			
Betonalter	c <sub>cal</sub> in mmol/l				pH	pH <sub>cal</sub>
d	K	Na	Na+K	SO <sub>4</sub>		
Analysewerte Lagerung SAL						
1	330	51	381	-	-	13,58
3	384	74	458	-	-	13,66
7	319	63	382	-	-	13,58
28	378	92	470	-	-	13,67
56	191	48	239	-	-	13,38
91	253	62	315	-	-	13,50
Analysewerte Lagerung SAL-K						
1	330	51	381	-	-	13,58
3	415	78	492	-	-	13,69
7	454	86	540	-	-	13,73
28	502	116	618	-	-	13,79
56	338	72	410	-	-	13,61
91	341	70	412	-	-	13,61
Analysewerte Lagerung NK40						
1	330	51	381	-	-	13,58
3	405	86	491	-	-	13,69
7	284	64	348	-	-	13,54
28	304	89	393	-	-	13,59
56	193	61	253	-	-	13,40
91 <sup>1)</sup>	246	67	314	-	-	13,50
1) ggf. zu hoher Wert durch temporäre Austrocknung infolge eines defekten Defensors						
Analysewerte Lagerung NK40-K						
1	330	51	381	-	-	13,58
3	402	83	485	-	-	13,69
7	389	81	469	-	-	13,67
28	387	107	494	-	-	13,69
56	261	71	332	-	-	13,52
91	307	80	387	-	-	13,59
Analysewerte Lagerung Ü60						
1	330	51	381	-	-	-
3	331	68	399	36	-	13,51
7	291	68	358	43	-	13,43
28	333	81	414	43	-	13,52
56	291	79	370	54	-	13,42
91	277	76	353	91	-	13,23
Analysewerte Lagerung Ü60-K						
1	330	51	381	-	-	-
3	359	75	434	34	-	13,56
7	320	75	395	42	-	13,49
28	342	84	426	46	-	13,52
56	341	87	428	63	-	13,48
91	288	77	366	96	-	13,24

Tafel A-24: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B12

B12	Zement	CEM II/A-D	w. Hauptb.	Silikastaub	Anteil [%]	10
	z [kg/m³]	500	K <sub>2</sub> O <sub>CEM1</sub> [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O <sub>CEM1</sub> [M.-%]	0,26
			K <sub>2</sub> O <sub>D</sub> [M.-%]	0,39	Na <sub>2</sub> O <sub>D</sub> [M.-%]	0,12
			w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
Alkaliempfindliche Gesteinskörnung			keine (100 % reiner Kalkstein)			
Betonalter	c <sub>cal</sub> in mmol/l				pH	pH <sub>cal</sub>
d	K	Na	Na+K	SO <sub>4</sub>		
Analysewerte Lagerung SAL						
1	416	65	482	-	-	13,68
3	413	73	486	-	-	13,69
7	358	70	427	-	-	13,63
28	218	54	271	-	-	13,43
56	184	42	226	-	-	13,35
91	112	30	142	-	13,10	13,15
Analysewerte Lagerung SAL-K						
1	416	65	482	-	-	13,68
3	432	80	512	-	-	13,71
7	397	73	470	-	-	13,67
28	277	63	340	-	-	13,53
56	230	51	281	-	-	13,45
91	170	38	208	-	13,35	13,32
Analysewerte Lagerung NK40						
1	416	65	482	-	-	13,68
3	244	54	298	-	-	13,47
7	182	44	225	-	-	13,35
28	183	51	234	-	-	13,37
56	175	42	217	-	-	13,34
91	149	40	189	-	13,31	13,28
Analysewerte Lagerung NK40-K						
1	416	65	482	-	-	13,68
3	278	56	333	-	-	13,52
7	217	52	269	-	-	13,43
28	212	51	263	-	-	13,42
56	228	51	279	-	-	13,45
91	196	46	242	-	13,41	13,38
Analysewerte Lagerung Ü60						
1	416	65	482	-	-	-
3	195	40	235	36	-	13,21
7	195	42	237	37	-	13,21
28	283	64	347	32	-	13,45
56	284	62	346	39	13,37	13,43
91	211	55	265	64	-	13,14
Analysewerte Lagerung Ü60-K						
1	416	65	482	-	-	-
3	186	39	225	31	-	13,21
7	203	38	241	37	-	13,22
28	288	64	352	36	-	13,45
56	269	60	329	42	13,40	13,39
91	278	64	342	85	-	13,24

Tafel A-25: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B13

<b>B13</b>	Zement	CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z [kg/m <sup>3</sup> ]	500	w/z	0,55	Sieblinie	B/C16
	Alkaliempfindliche Gesteinskörnung			15 M.-% Kies mit Opalsandstein und Flint (OF)		
Betonalter	c <sub>cal</sub> in mmol/l				pH	pH <sub>cal</sub>
d	K	Na	Na+K	SO <sub>4</sub>		
Analysewerte Lagerung SAL						
1	455	65	520	-	-	13,72
3	438	73	511	-	-	13,71
7	380	75	456	-	-	13,66
28	275	67	342	-	-	13,53
56	224	49	273	-	-	13,44
91	299	64	363	-	-	13,56
Analysewerte Lagerung SAL-K						
1	455	65	520	-	-	13,72
3	431	77	508	-	-	13,71
7	376	73	449	-	-	13,65
28	438	97	536	-	-	13,73
56	335	65	400	-	-	13,60
91	353	75	427	-	-	13,63
Analysewerte Lagerung NK40						
1	455	65	520	-	-	13,72
3	420	80	501	-	-	13,70
7	339	74	413	-	-	13,62
28	255	70	324	-	-	13,51
56	176	35	211	-	-	13,32
91	197	50	247	-	-	13,39
Analysewerte Lagerung NK40-K						
1	455	65	520	-	-	13,72
3	461	85	546	-	13,73	13,74
7	380	75	455	-	13,74	13,66
28	379	95	474	-	13,72	13,68
56	300	62	362	-	-	13,56
91	285	67	352	-	13,47	13,55
Analysewerte Lagerung Ü60						
1	455	65	520	-	-	13,72
3	440	85	525	51	-	13,63
7	419	83	502	60	-	13,58
28	293	74	367	42	-	13,45
56	267	64	331	36	-	13,41
91	262	61	322	31	-	13,41
Analysewerte Lagerung Ü60-K						
1	455	65	520	-	-	13,72
3	379	73	452	45	13,61	13,56
7	423	79	502	65	13,55	13,57
28	351	84	436	50	13,55	13,53
56	314	72	386	46	13,46	13,47
91	329	79	408	50	13,45	13,49

Tafel A-26: Ergebnisse der Porenlösungsanalysen ausgepresst aus Beton B14

<b>B14</b>	Zement	CEM I (1,3)	K <sub>2</sub> O [M.-%]	1,56	Na <sub>2</sub> O [M.-%]	0,26
	z [kg/m <sup>3</sup> ]	500	w/z	0,55	Sieblinie	A/B16
	Alkaliempfindliche Gesteinskörnung			70 M.-% Splitt mit silif. Kalkst. und Hornst. (SKH)		
Betonalter	ceal in mmol/l				pH	pHeal
d	K	Na	Na+K	SO <sub>4</sub>		
Analysewerte Lagerung SAL						
1	375	68	443	-	-	13,65
3	391	77	468	-	-	13,67
7	356	76	432	-	-	13,64
28	376	93	469	-	-	13,67
56	330	69	399	-	-	13,60
91	252	58	310	-	-	13,49
Analysewerte Lagerung SAL-K						
1	375	68	443	-	-	13,65
3	387	76	463	-	-	13,67
7	384	78	462	-	-	13,66
28	471	101	572	-	-	13,76
56	448	90	539	-	-	13,73
91	428	80	508	-	-	13,71
Analysewerte Lagerung NK40						
1	375	68	443	-	-	13,65
3	394	66	460	-	-	13,66
7	360	78	438	-	-	13,64
28	327	87	414	-	-	13,62
56	181	45	226	-	-	13,35
91 <sup>1)</sup>	156	45	201	-	-	13,30
1) ggf. zu hoher Wert durch temporäre Austrocknung infolge eines defekten Defensors						
Analysewerte Lagerung NK40-K						
1	375	68	443	-	-	13,65
3	401	83	484	-	13,72	13,68
7	429	88	517	-	13,71	13,71
28	484	115	599	-	13,70	13,78
56	401	80	482	-	13,72	13,68
91	365	78	443	-	13,73	13,65
Analysewerte Lagerung Ü60						
1	375	68	443	-	-	13,65
3	503	102	606	97	-	13,62
7	494	104	599	89	-	13,62
28	375	75	450	68	-	13,50
56	298	72	370	43	-	13,45
91	252	65	317	36	-	13,39
Analysewerte Lagerung Ü60-K						
1	375	68	443	-	-	13,65
3	465	99	564	80	13,64	13,61
7	490	104	594	83	13,54	13,63
28	399	78	476	72	13,49	13,52
56	406	84	490	69	13,48	13,55
91	317	74	391	56	13,49	13,44

Tafel A-27: Ergebnis der STA-Untersuchungen an Zementsteinen, CH-Gehalt in Abhängigkeit vom Alter und der Lagerung (Temperaturregime)

Alter in d	Zementstein (w/z = 0,55) aus Zement			
	CEM I (1,3)	CEM II/A-S	CEM II/A-V	CEM II/A-D
CH-Gehalt in g/100g Z				
Analysewerte Lagerung SAL-K				
1	12	10	10	11
3	15	12	13	13
7	17	13	13	12
28	18	14	15	10
56	19	12	14	8
91	20	12	14	8
Analysewerte Lagerung NK40-K				
1	12	10	10	11
3	17	12	13	10
7	17	12	14	8
28	18	12	12	6
56	19	12	11	7
91	19	12	11	6
Analysewerte Lagerung Ü60-K				
1	12	10	10	11
3	17	12	10	7
7	18	12	11	7
28	17	13	11	7
56	19	13	10	6
91	20	12	10	5

Tafel A-28: Chemische Zusammensetzung der gemahlten Stückenwassergläser (Angaben des Herstellers in [Cog 04])

Bezeichnung	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Molverhältnis	Gewichtsverhältnis
	M.-%				
Na (4,13)	79,6	19,9	-	4,13	4,00
Na (3,36)	76,5	23,5	-	3,36	3,25
Na (2,12)	66,9	32,6	-	2,12	2,05
K (4,15)	72,3	-	27,2	4,15	2,65
K (3,37)	68,0	-	31,5	3,37	2,15

Tafel A-29: Maximale Dehnung, Zeitpunkt der Erstschädigung und weitere Beobachtungen während der Mörtelprimentests

Lage- rung	Molare Verhältnisse			$\epsilon_{\max}$	$t_s$	Beobachtungen
	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /K <sub>2</sub> O	CaO/SiO <sub>2</sub>	mm/m	d	
Ü60	4,13	-	-	2,135	10	2 R $\geq$ 0,1 mm, großfl. AS,
	-	4,15	-	1,240	7	1 R < 0,1 mm, großfl. AS, 1 PO
	3,36	-	-	1,145	7	1 R < 0,1 mm, großfl. AS, 2 PO
			0,2	0,610	7	1 R < 0,1 mm, großfl. AS, 3 PO
	-	3,37	-	0,825	3	1 R < 0,1 mm, großfl. AS, 2 PO
			0,2	1,200	3	2 R < 0,1 mm, großfl. AS, 1 PO
	2,12	-	-	0,300	7	großfl. AS
			0,2	6,980	7	3 R $\geq$ 0,1 mm, kleine AS, 1 PO
NK40	4,13	-	-	4,310	21	2 R $\geq$ 0,1 mm, 1 R < 0,1 mm, 1 kleine + 1 großfl. AS
			0,2	1,890	49	1 R $\geq$ 0,1 mm
			0,4	2,275	63	1 R $\geq$ 0,1 mm, 1 R < 0,1 mm, kleine AS
			0,8	3,330	107	2 R $\geq$ 0,1 mm, großfl. AS
	-	4,15	-	5,030	7	3 R $\geq$ 0,1 mm, großfl. AS
			0,2	1,560	24	1 R $\geq$ 0,1 mm, kleine AS
			0,4	-	-	-
			0,8	-	-	-
	3,36	-	-	4,660	10	3 R $\geq$ 0,1 mm, großfl. AS
			0,2	1,860	14	3 R < 0,1 mm, kleine AS
	-	3,37	-	0,990	7	1 R < 0,1 mm, großfl. AS, 1 PO
			0,2	1,320	10	1 R < 0,1 mm, großfl. AS, 1 PO
	2,12	-	-	1,170	10	2 R < 0,1 mm, großfl. AS
			0,2	5,665	10	3 R $\geq$ 0,1 mm, kleine AS
			0,4	1,905	14	1 R $\geq$ 0,1 mm, 2 R < 0,1 mm, kleine AS
			0,8	-	-	-

Tafel A-29 (Fortsetzung)

Lagerung	Molare Verhältnisse			$\epsilon_{\max}$	$t_s$	Beobachtungen
	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /K <sub>2</sub> O	CaO/SiO <sub>2</sub>	mm/m	d	
Ü40	4,13	-	-	5,450	49	3 R ≥ 0,1 mm, großfl. AS
	-	4,15	-	3,615	18	3 R ≥ 0,1 mm, großfl. AS
	3,36	-	-	3,210	18	3 R ≥ 0,1 mm, großfl. AS, 1 PO
	-	3,37	-	1,600	14	2 R ≥ 0,1 mm, großfl. AS
	2,12	-	-	0,490	14	2 R < 0,1 mm, großfl. AS
NK20	4,13	-	-	2,315	184	1 R ≥ 0,1 mm, 1 kleine AS
	-	4,15	-	5,375	28	3 R ≥ 0,1 mm, großfl. AS
	3,36	-	-	4,090	35	3 R ≥ 0,1 mm, kleine AS
			0,2	2,575	149	3 R < 0,1 mm
	-	3,37	-	4,035	21	3 R ≥ 0,1 mm, großfl. AS
			0,2	2,590	21	3 R < 0,1 mm
	2,12	-	-	2,175	28	1 R ≥ 0,1 mm, 1 R < 0,1 mm, kleine AS
			0,2	2,280	56	1 R ≥ 0,1 mm, 2 R < 0,1 mm, kleine AS
Ü20	4,13	-	-	-	-	-
	-	4,15	-	5,315	49	3 R ≥ 0,1 mm, großfl. AS
	3,36	-	-	4,550	49	3 R ≥ 0,1 mm
	-	3,37	-	2,070	28	2 R ≥ 0,1 mm, großfl. AS, 1 PO
	2,12	-	-	1,125	35	2 R < 0,1 mm, großfl. AS
BC20	3,36	-	-	1,885	184	1 R ≥ 0,1 mm
	-	3,37	-	2,755	42	3 R ≥ 0,1 mm, kleine AS (fest)
	2,12	-	-	0,255	49	1 R < 0,1 mm, großfl. AS
KB20	3,36	-	-	-	-	-
	-	3,37	-	0,430	98	1 R ≥ 0,1 mm
	2,12	-	-	-0,095	56	2 R < 0,1 mm, kleine AS

Tafel A-29 (Fortsetzung)

Lagerung	Molare Verhältnisse			$\epsilon_{\max}$	$t_s$	Beobachtungen
	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /K <sub>2</sub> O	CaO/SiO <sub>2</sub>	mm/m	d	
Ü8	3,36	-	-	1,680	149	1 R $\geq$ 0,1 mm, 1 R < 0,1 mm, großfl. AS
	-	3,37	-	-	35	Prisma vor Prüfbeginn zerbrochen, 2 R $\geq$ 0,1 mm, großfl. AS
R = Riss/e AS = Ausscheidung/en PO = Pop-out/s des/r Kleberpfropfen/s						

## ANHANG B – Bilder

- Bild B-1: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Lagerung; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel (SAL, NK40) bzw. 7,5x7,5x28 cm<sup>3</sup> Prismen (Ü60) mit jeweils A/V = 0,6 cm<sup>-1</sup> ..... 222
- Bild B-2: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Probekörpergröße; Beton mit Zement CEM I (1,3), z = 400 kg/m<sup>3</sup>, w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16, Lagerung SAL (links) und Lagerung NK40 (rechts)..... 222
- Bild B-3: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zementart; Beton mit z = 500 kg/m<sup>3</sup>, w/z = 0,55; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C 16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel, Lagerung SAL (oben links), NK40 (oben rechts) und Ü60 (links) 223
- Bild B-4: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge in Abhängigkeit von der Lagerung; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel (SAL, NK40) bzw. 7,5x7,5x28 cm<sup>3</sup> Prismen (Ü60) mit jeweils A/V = 0,6 cm<sup>-1</sup>..... 224
- Bild B-5: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge (links) und des im Probekörper verbleibenden Kaliumanteils (rechts) in Abhängigkeit von der Probekörpergröße; Beton mit 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3); w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B 16, Lagerung SAL ..... 224
- Bild B-6: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge in Abhängigkeit vom Alkaligehalt des CEM I-Zements; Beton mit z = 500 kg/m<sup>3</sup>, w/z = 0,55; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C 16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel ..... 225
- Bild B-7: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge in Abhängigkeit von der Zementart (Hauptbestandteil); Beton mit z = 500 kg/m<sup>3</sup>, w/z = 0,55; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C 16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel, Lagerung SAL (oben links), NK40 (oben rechts) und Ü60 (links)..... 226
- Bild B-8: Zeitlicher Verlauf der der absolut ausgelaugten Kaliummenge in Abhängigkeit vom w/z-Wert; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel, Lagerung SAL und NK40..... 227
- Bild B-9: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge in Abhängigkeit von der Sieblinie; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), w/z = 0,45 und inertem Kalkstein; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel, Lagerung SAL und NK40..... 227

Bild B-10:	Gelausscheidungen am Würfel mit Gesteinskörnung OF nach 28d in Lagerung SAL-K (links) und NK40-K (rechts).....	228
Bild B-11:	Ableitung des Reaktionsbeginns der Flugasche im Zement CEM II/A-V in Abhängigkeit vom Temperaturregime bei den Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K .....	229
Bild B-12:	Ableitung des Reaktionsbeginns des Silikastaubs im Zement CEM II/A-D in Abhängigkeit vom Temperaturregime bei den Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K .....	230
Bild B-13:	Ableitung des Reaktionsbeginns des Hüttsands im Zement CEM II/A-S in Abhängigkeit vom Temperaturregime bei den Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K .....	231
Bild B-14:	Kumuliertes Porenvolumen im Feinmörtel eines Betons mit CEM I (1,3) in Abhängigkeit von der Lagerung, links im Alter von 7d und rechts im Alter von 91d.....	232
Bild B-15:	Kumuliertes Porenvolumen im Feinmörtel eines Betons mit CEM II/A-S in Abhängigkeit von der Lagerung, links im Alter von 7d und rechts im Alter von 91d.....	232
Bild B-16:	Kumuliertes Porenvolumen im Feinmörtel eines Betons mit CEM II/A-V in Abhängigkeit von der Lagerung, links im Alter von 7d und rechts im Alter von 91d.....	233
Bild B-17:	Kumuliertes Porenvolumen im Feinmörtel eines Betons mit CEM II/A-D in Abhängigkeit von der Lagerung, links im Alter von 7d und rechts im Alter von 91d.....	233
Bild B-18:	Wasseraufnahme der Wassergläser bei einer Temperatur von $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und unterschiedlicher relativer Luftfeuchte .....	234
Bild B-19:	Wasseraufnahme der Wassergläser bei $r.F. = 100\%$ und unterschiedlicher Temperatur.....	235
Bild B-20:	Mörtelprismen gefüllt mit einem K-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung unter verschiedenen Feuchtebedingungen bei $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	236
Bild B-21:	Mörtelprismen gefüllt mit einem Na-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung unter verschiedenen Feuchtebedingungen bei $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	237
Bild B-22:	Querschnitt von Mörtelprismen gefüllt mit einem K-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung unter verschiedenen Feuchtebedingungen bei $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	238
Bild B-23:	Querschnitt von Mörtelprismen gefüllt mit einem Na-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung unter verschiedenen Feuchtebedingungen bei $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	239
Bild B-24:	Querschnitt von Mörtelprismen gefüllt mit Na-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung bei verschiedenen Lagerungstemperaturen über Wasser .....	240

Bild B-25: Mörtelprismen gefüllt mit Na-Stückenwassergläsern unterschiedlichen molaren Verhältnisses $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ gelagert bei $T = 20^\circ \text{C}$ über Wasser nach Beendigung der Prüfung .....	241
Bild B-26: Querschnitt von Mörtelprismen gefüllt mit Na-Stückenwassergläsern unterschiedlichen molaren Verhältnisses $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ gelagert bei $T = 20^\circ \text{C}$ über Wasser nach Beendigung der Prüfung.....	242
Bild B-27: Querschnitt von Mörtelprismen gefüllt mit Na-Stückenwasserglas ohne und mit Beimischung von CH gelagert bei $T = 60^\circ \text{C}$ über Wasser nach Beendigung der Prüfung .....	242

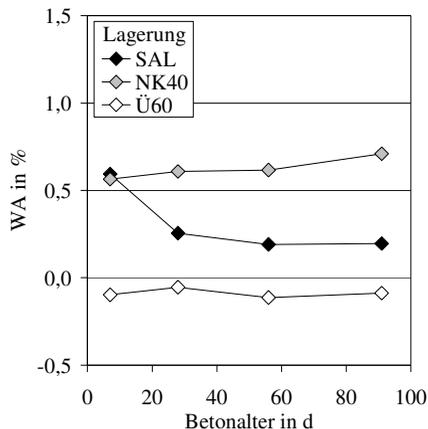


Bild B-1: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Lagerung; Beton mit Zement  $400 \text{ kg/m}^3$  CEM I (1,3),  $w/z = 0,45$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16;  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Würfel (SAL, NK40) bzw.  $7,5 \times 7,5 \times 28 \text{ cm}^3$  Prismen (Ü60) mit jeweils  $A/V = 0,6 \text{ cm}^{-1}$

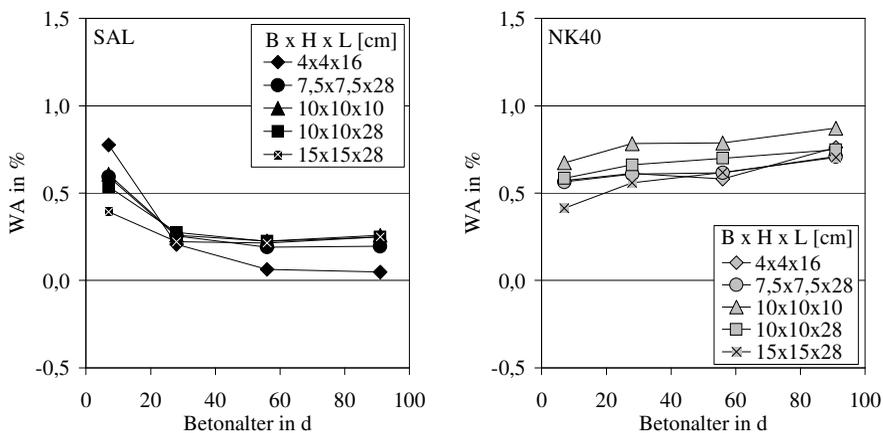


Bild B-2: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Probekörpergröße; Beton mit Zement CEM I (1,3),  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,45$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16, Lagerung SAL (links) und Lagerung NK40 (rechts)

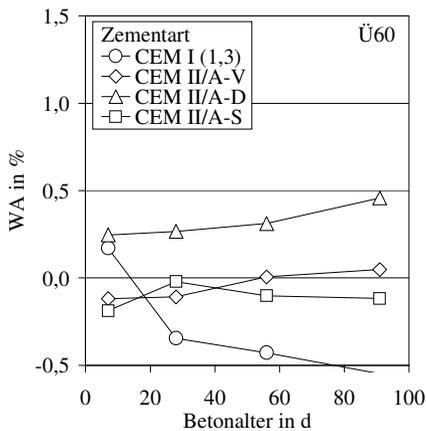
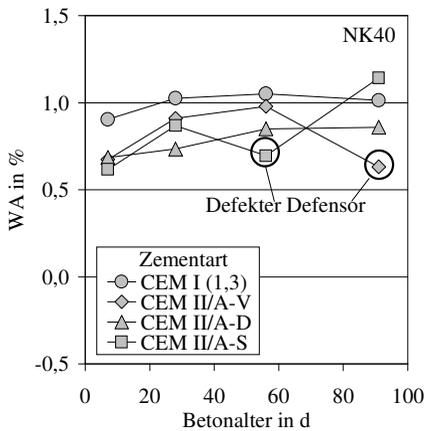
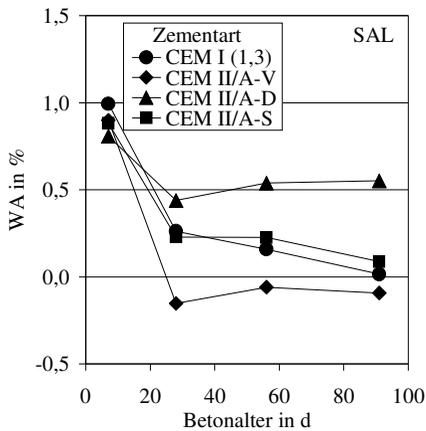


Bild B-3: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zementart; Beton mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C 16;  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Würfel, Lagerung SAL (oben links), NK40 (oben rechts) und Ü60 (links)

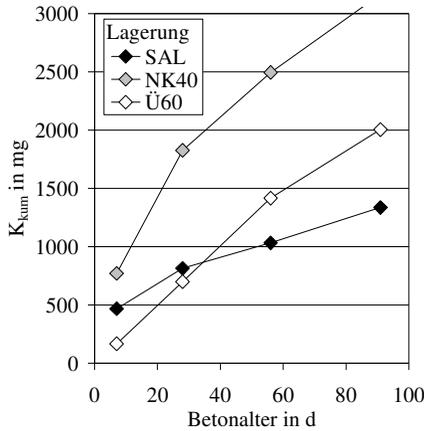


Bild B-4: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge in Abhängigkeit von der Lagerung; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel (SAL, NK40) bzw. 7,5x7,5x28 cm<sup>3</sup> Prismen (Ü60) mit jeweils A/V = 0,6 cm<sup>-1</sup>

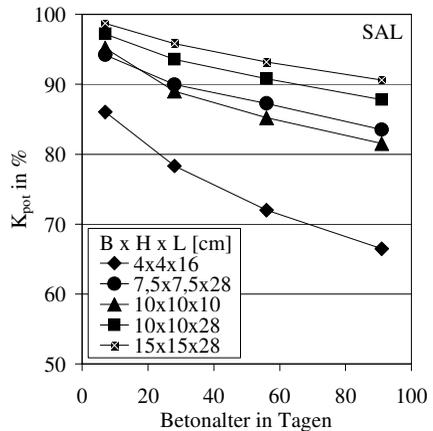
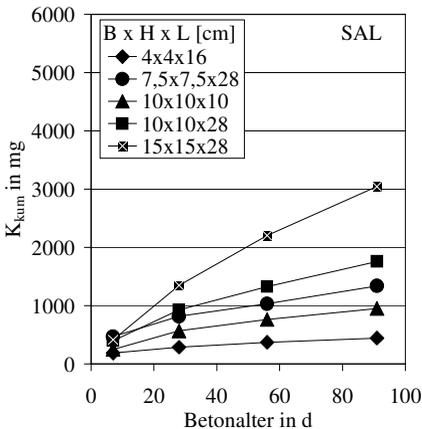


Bild B-5: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge (links) und des im Probekörper verbleibenden Kaliumanteils (rechts) in Abhängigkeit von der Probekörpergröße; Beton mit 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3); w/z = 0,45; inertem Kalkstein der Sieblinie A/B 16, Lagerung SAL

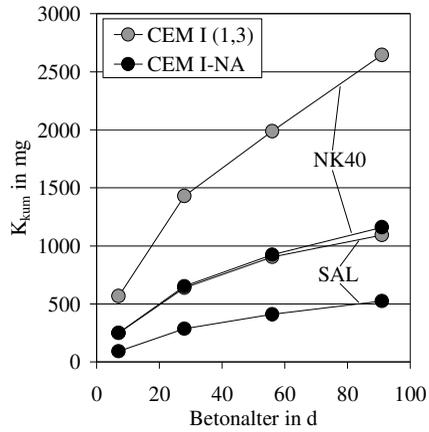


Bild B-6: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelaugten Kaliummenge in Abhängigkeit vom Alkaligehalt des CEM I-Zements; Beton mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C 16;  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Würfel

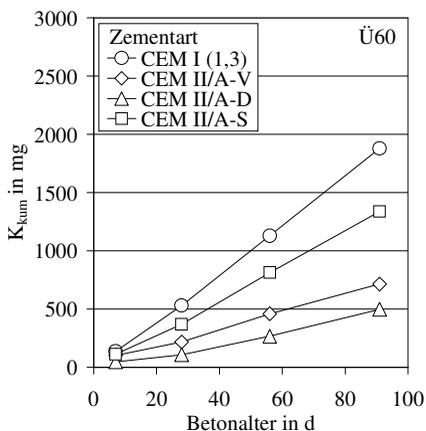
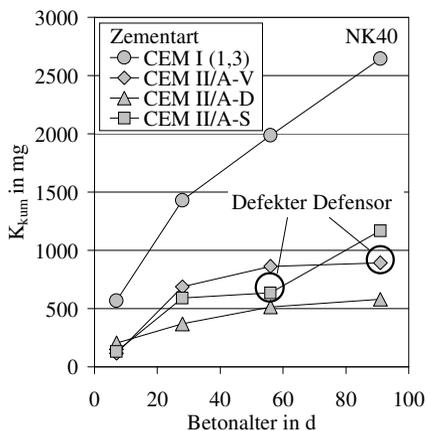
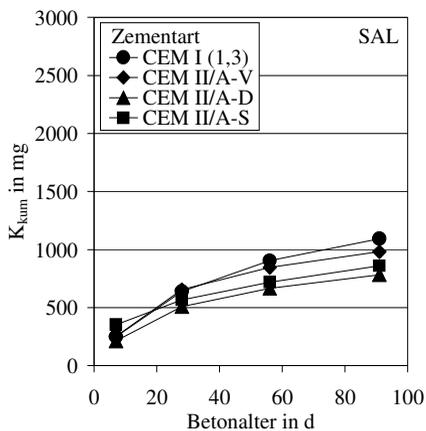


Bild B-7: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgeleigten Kaliummenge in Abhängigkeit von der Zementart (Hauptbestandteil); Beton mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,55$ ; inertem Kalkstein der Sieblinie B/C 16;  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Würfel, Lagerung SAL (oben links), NK40 (oben rechts) und Ü60 (links)

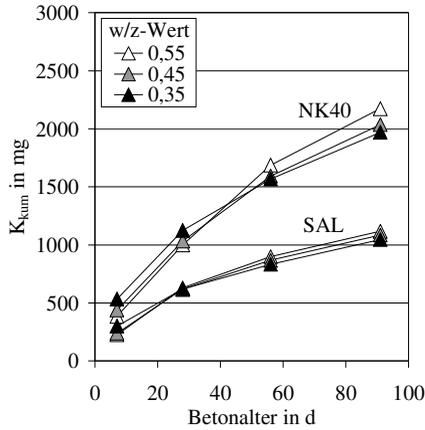


Bild B-8: Zeitlicher Verlauf der der absolut ausgelagten Kaliummenge in Abhängigkeit vom w/z-Wert; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), inertem Kalkstein der Sieblinie A/B16; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel, Lagerung SAL und NK40

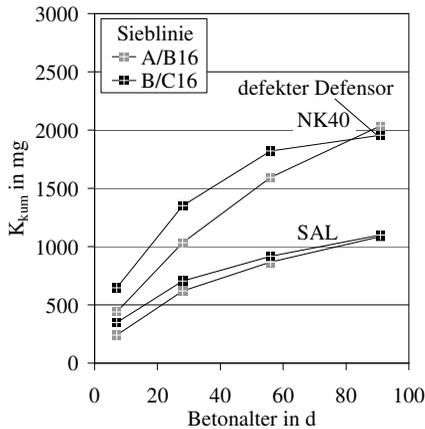


Bild B-9: Zeitlicher Verlauf der absolut ausgelagten Kaliummenge in Abhängigkeit von der Sieblinie; Beton mit Zement 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I (1,3), w/z = 0,45 und inertem Kalkstein; 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Würfel, Lagerung SAL und NK40



Bild B-10: Gelausscheidungen am Würfel mit Gesteinskörnung OF nach 28d in Lagerung SAL-K (links) und NK40-K (rechts)

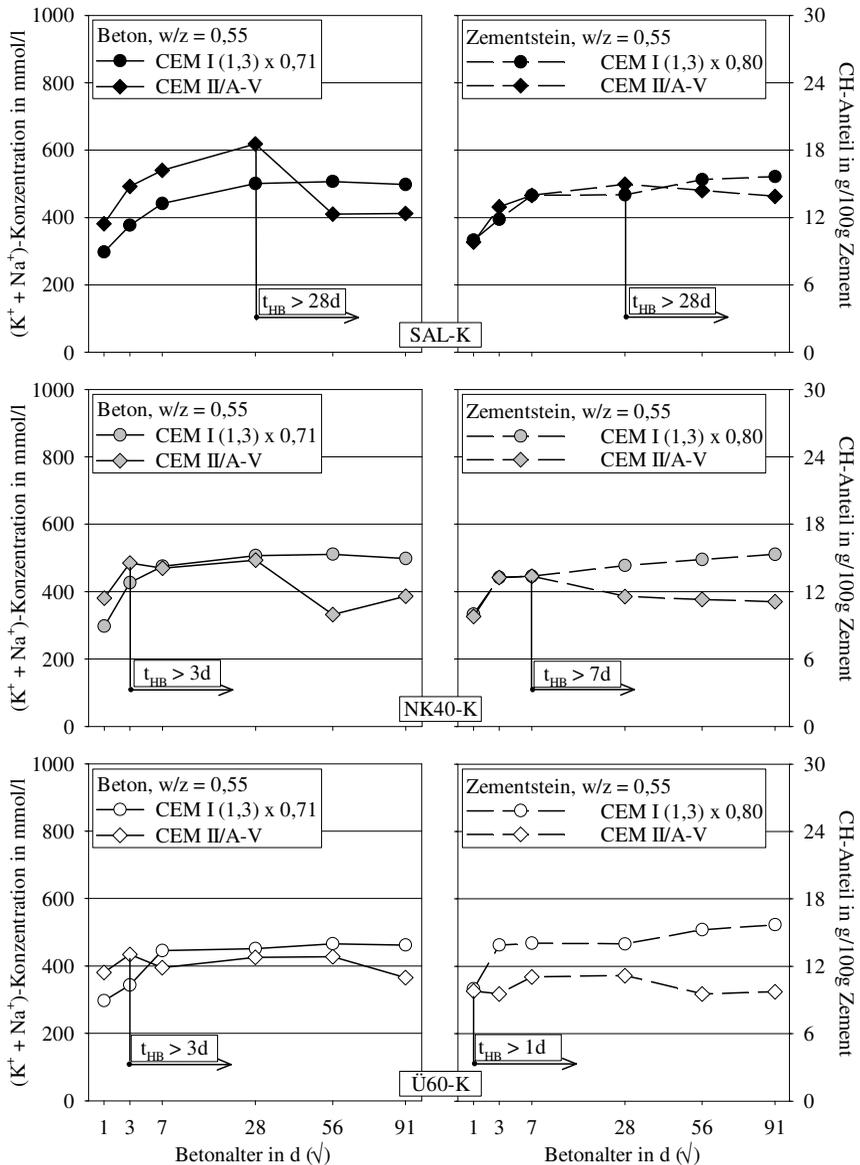


Bild B-11: Ableitung des Reaktionsbeginns der Flugasche im Zement CEM II/A-V in Abhängigkeit vom Temperaturregime bei den Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K

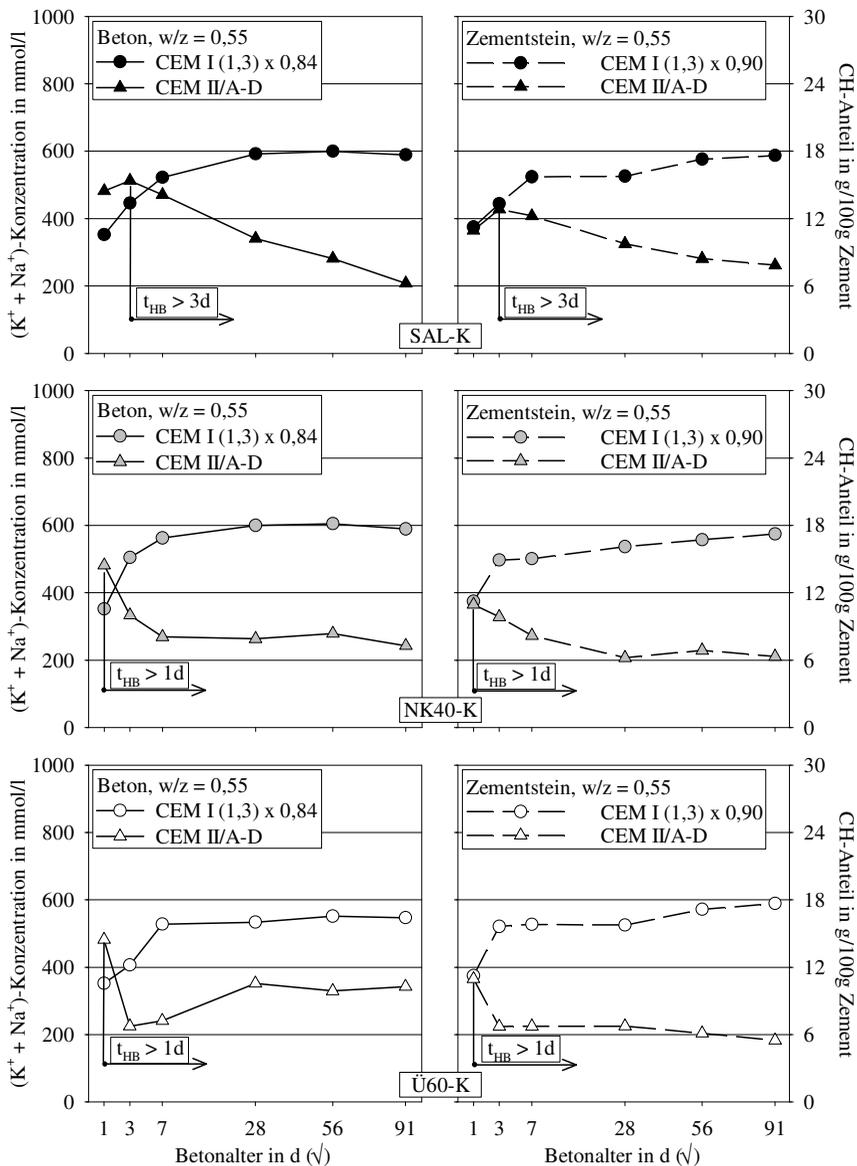


Bild B-12: Ableitung des Reaktionsbeginns des Silikastaubs im Zement CEM II/A-D in Abhängigkeit vom Temperaturregime bei den Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K

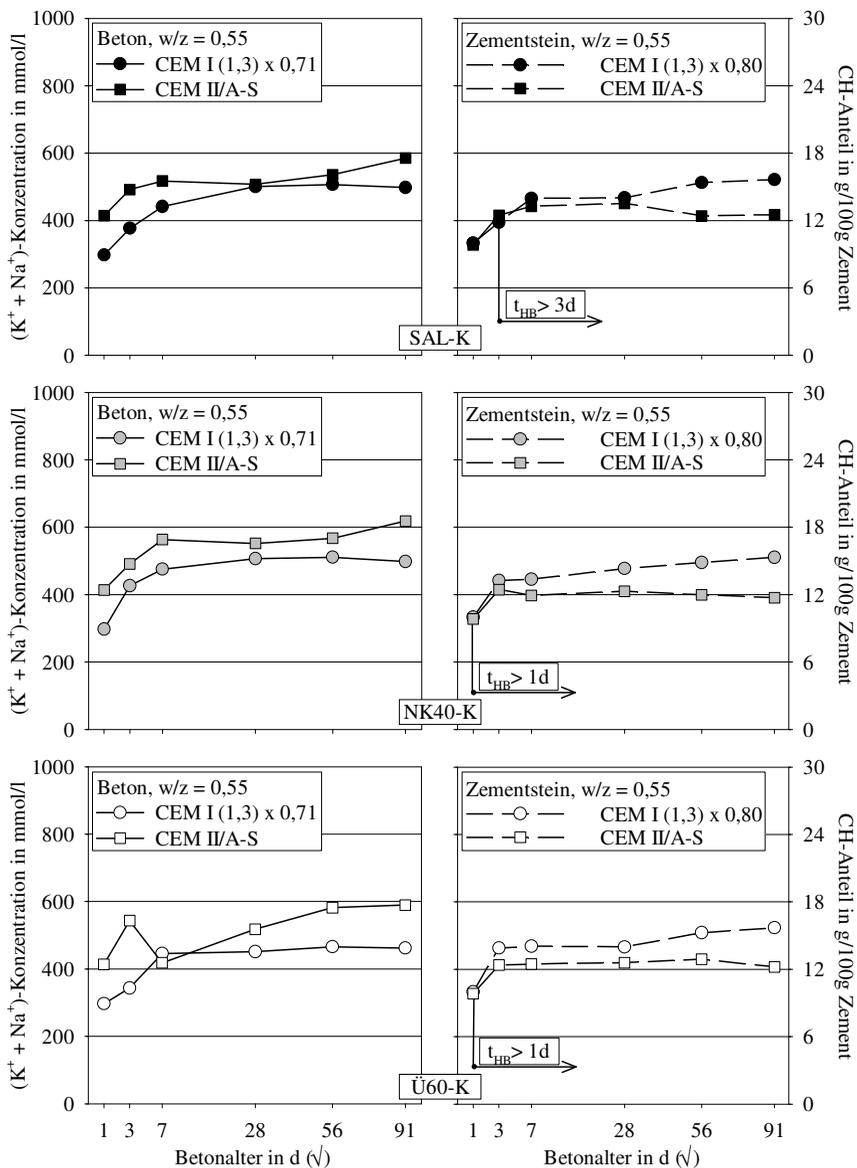


Bild B-13: Ableitung des Reaktionsbeginns des Hüttensands im Zement CEM II/A-S in Abhängigkeit vom Temperaturregime bei den Lagerungen SAL-K, NK40-K und Ü60-K

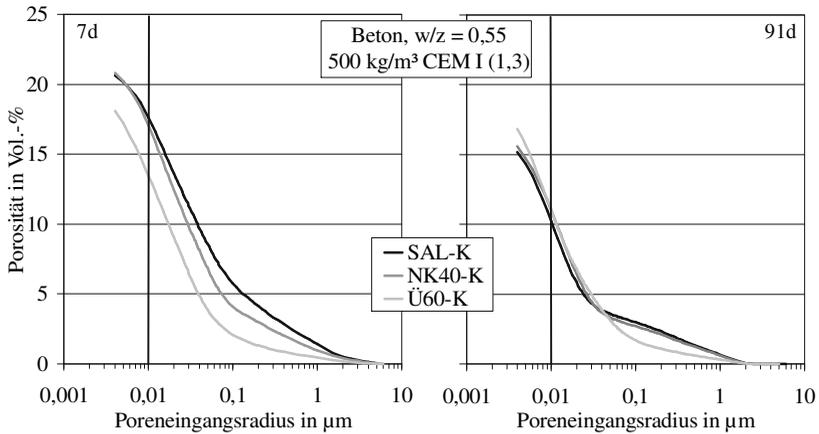


Bild B-14: Kumuliertes Porenvolumen im Feinmörtel eines Betons mit CEM I (1,3) in Abhängigkeit von der Lagerung, links im Alter von 7d und rechts im Alter von 91d

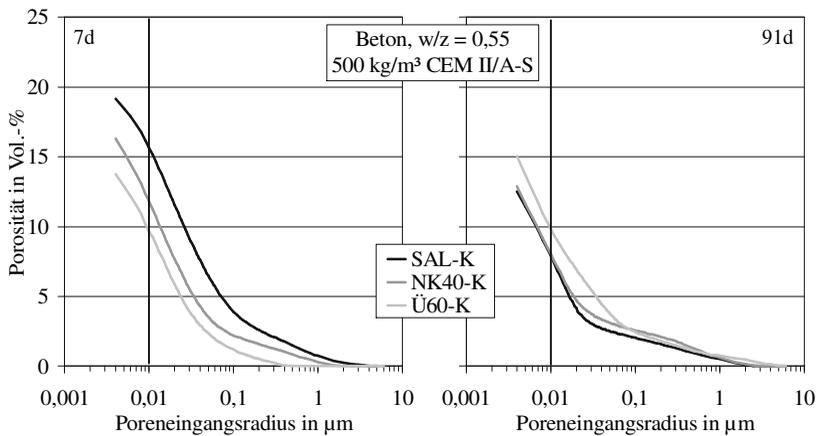


Bild B-15: Kumuliertes Porenvolumen im Feinmörtel eines Betons mit CEM II/A-S in Abhängigkeit von der Lagerung, links im Alter von 7d und rechts im Alter von 91d

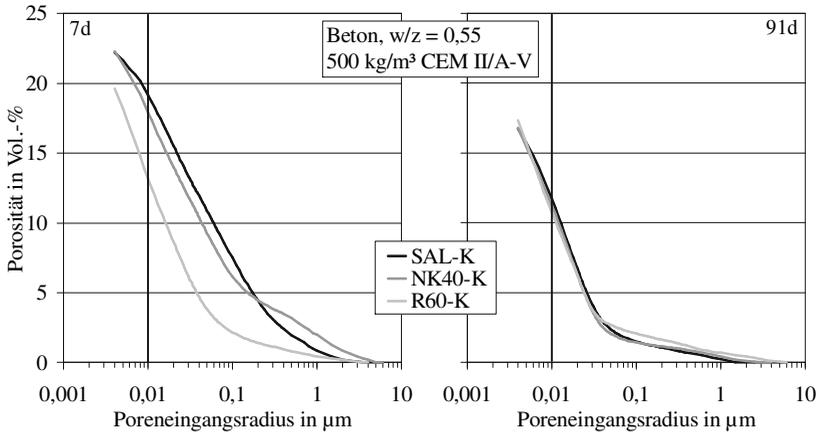


Bild B-16: Kumuliertes Porenvolumen im Feinmörtel eines Betons mit CEM II/A-V in Abhängigkeit von der Lagerung, links im Alter von 7d und rechts im Alter von 91d

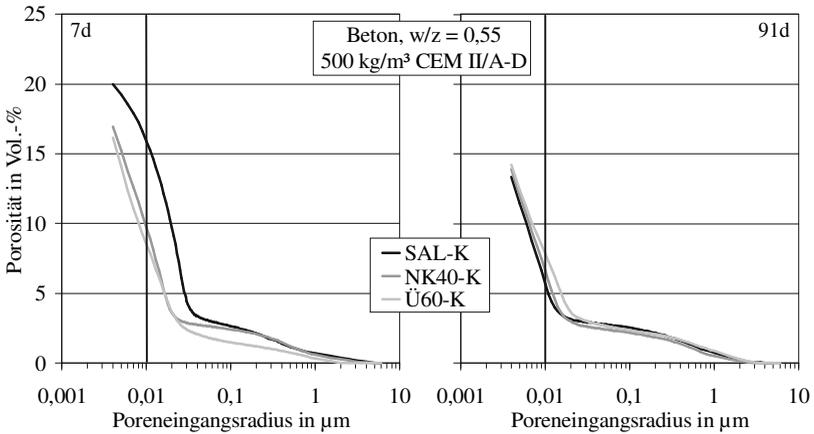


Bild B-17: Kumuliertes Porenvolumen im Feinmörtel eines Betons mit CEM II/A-D in Abhängigkeit von der Lagerung, links im Alter von 7d und rechts im Alter von 91d

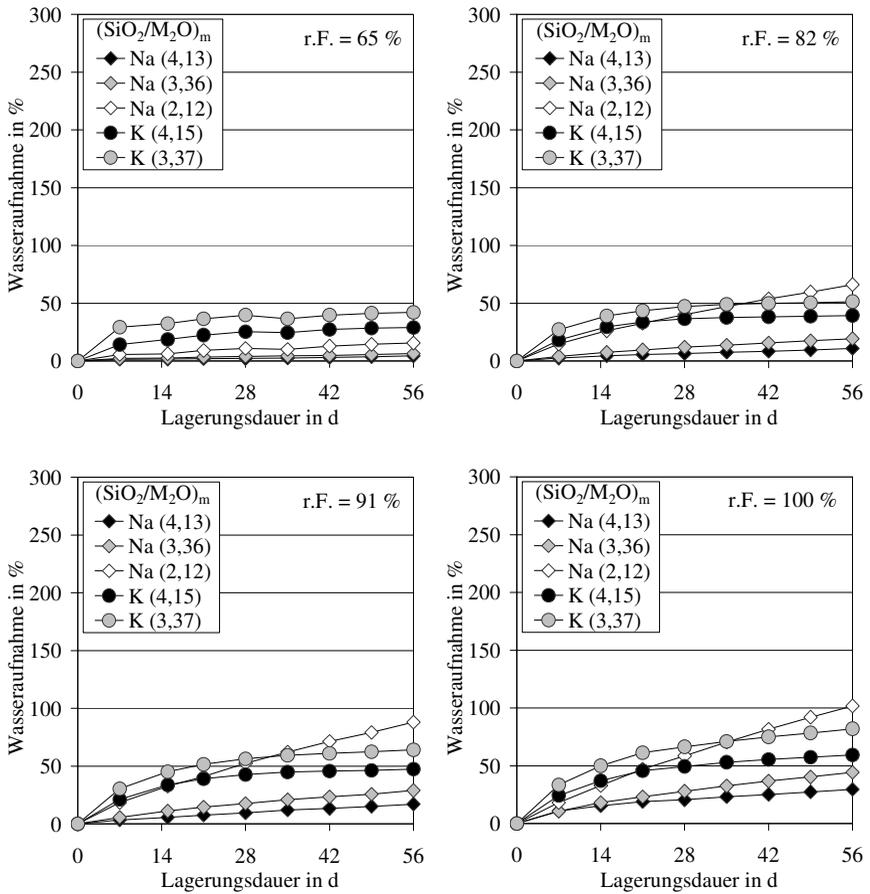


Bild B-18: Wasseraufnahme der Wassergläser bei einer Temperatur von  $T = 20\text{ °C}$  und unterschiedlicher relativer Luftfeuchte

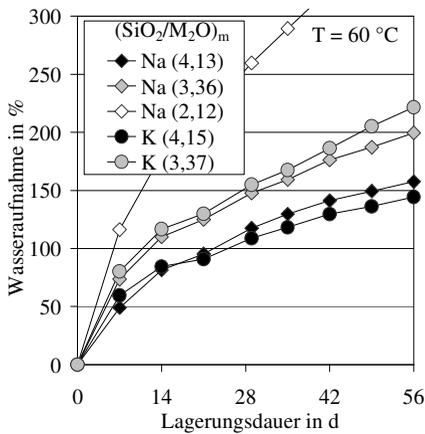
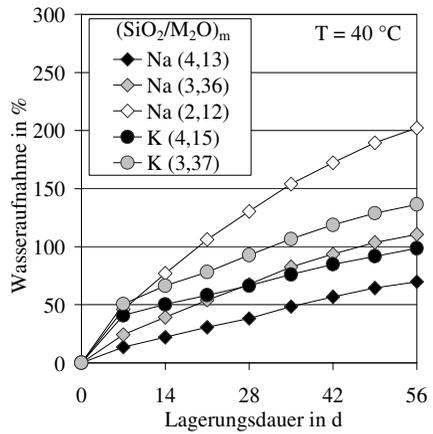
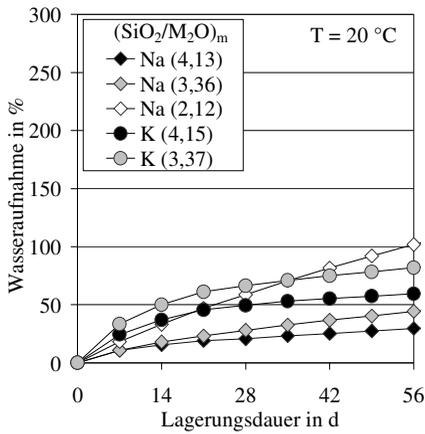


Bild B-19: Wasseraufnahme der Wassergläser bei r.F. = 100 % und unterschiedlicher Temperatur

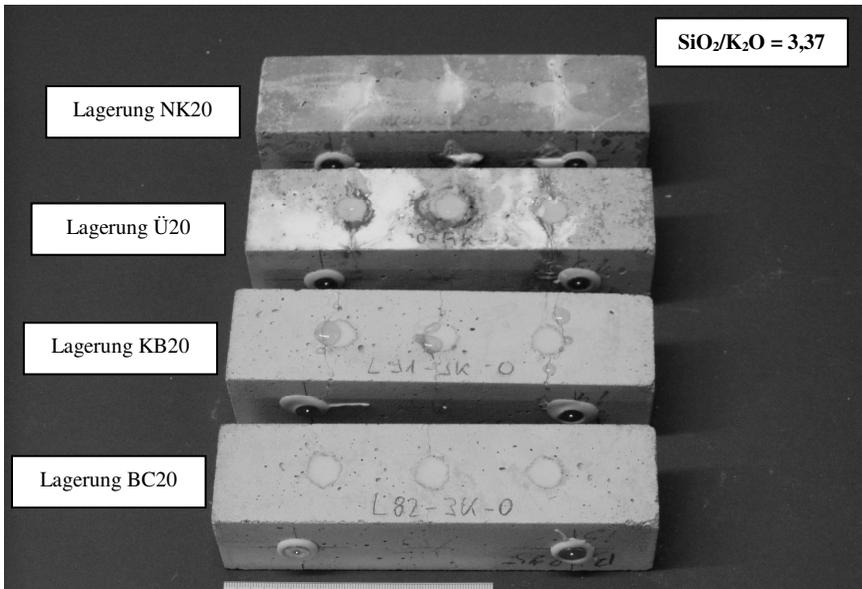


Bild B-20: Mörtelprismen gefüllt mit einem K-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung unter verschiedenen Feuchtebedingungen bei  $T = 20\text{ °C}$

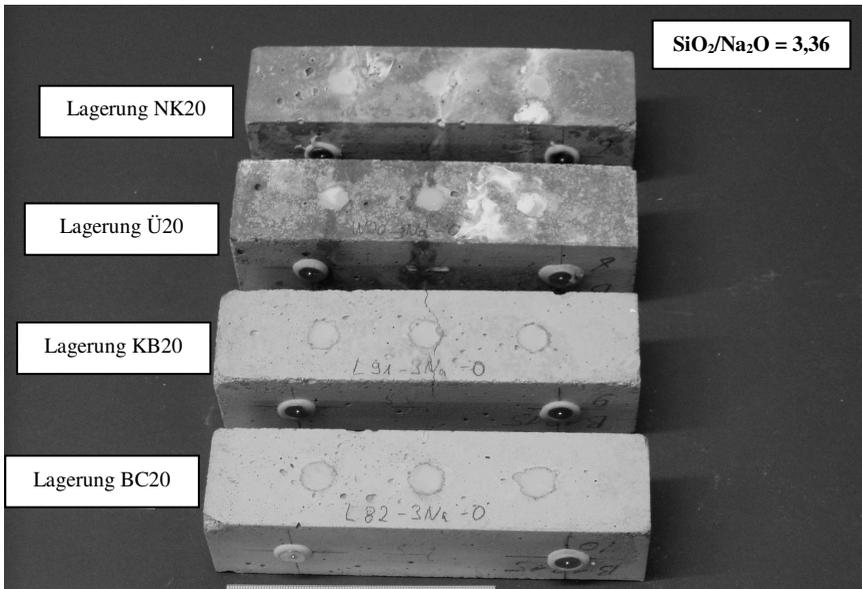


Bild B-21: Mörtelprismen gefüllt mit einem Na-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung unter verschiedenen Feuchtebedingungen bei  $T = 20\text{ °C}$

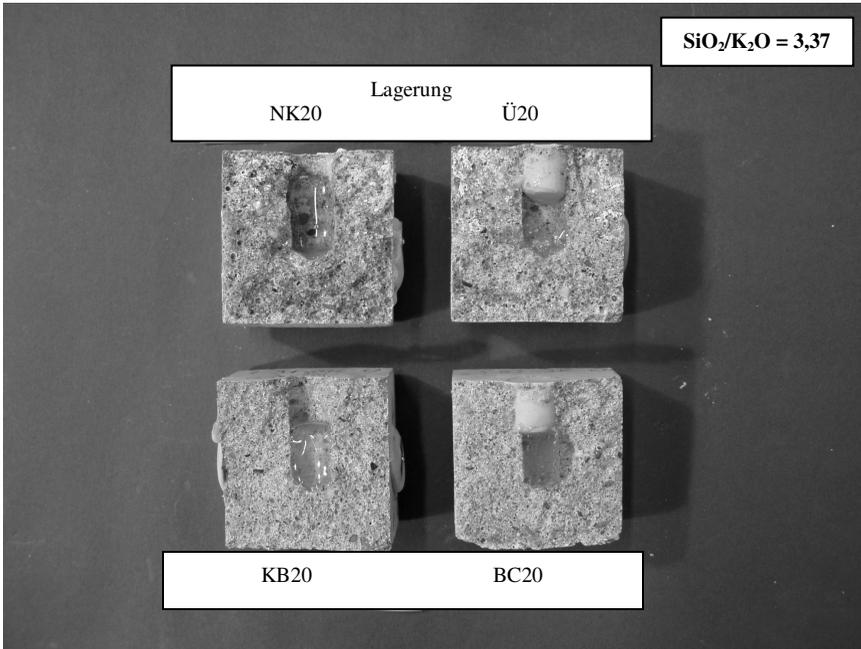


Bild B-22: Querschnitt von Mörtelpismen gefüllt mit einem K-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung unter verschiedenen Feuchtebedingungen bei  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$

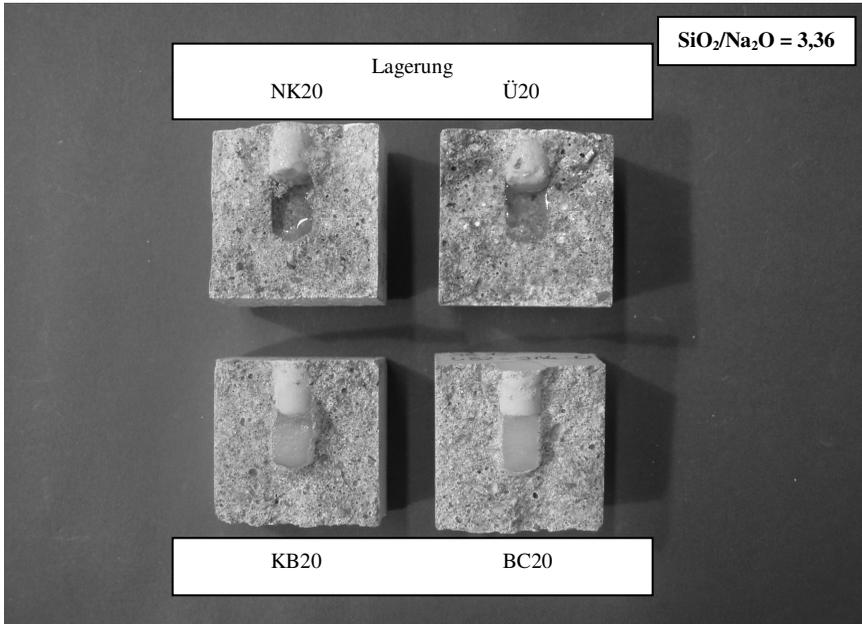


Bild B-23: Querschnitt von Mörtelpismen gefüllt mit einem Na-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung unter verschiedenen Feuchtebedingungen bei  $T = 20\text{ °C}$

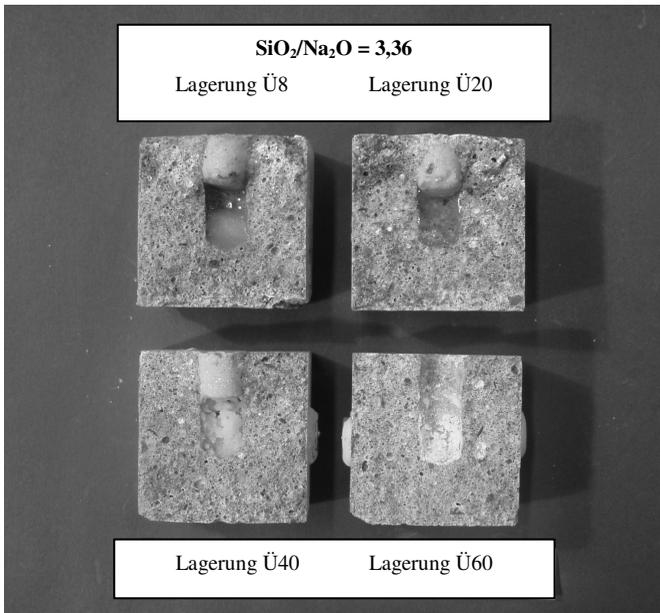


Bild B-24: Querschnitt von Mörtelpismen gefüllt mit Na-Stückenwasserglas nach Beendigung der Prüfung bei verschiedenen Lagerungstemperaturen über Wasser

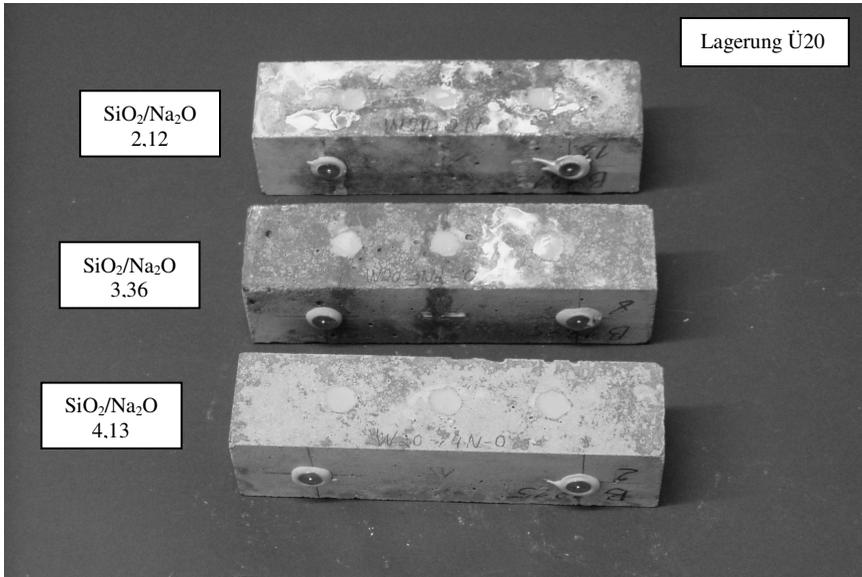


Bild B-25: Mörtelprismen gefüllt mit Na-Stückenwassergläsern unterschiedlichen molaren Verhältnisses SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O gelagert bei T = 20 ° C über Wasser nach Beendigung der Prüfung

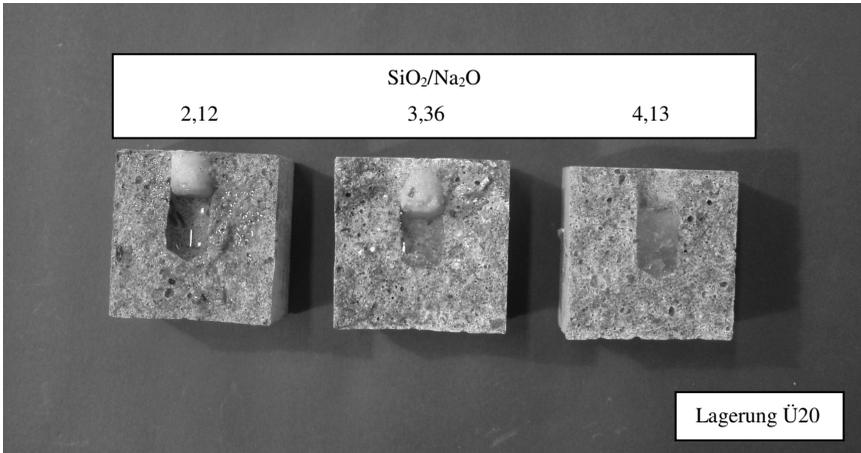


Bild B-26: Querschnitt von Mörtelpismen gefüllt mit Na-Stückenwassergläsern unterschiedlichen molaren Verhältnisses SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O gelagert bei T = 20 °C über Wasser nach Beendigung der Prüfung

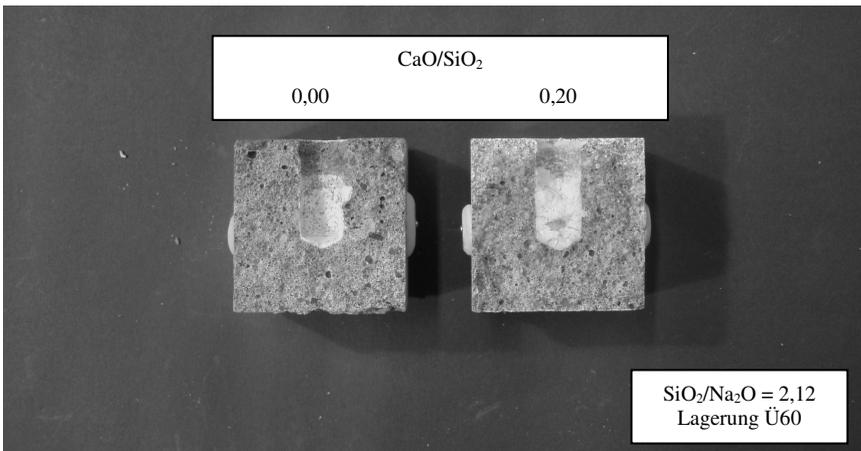


Bild B-27: Querschnitt von Mörtelpismen gefüllt mit Na-Stückenwasserglas ohne und mit Beimischung von CH gelagert bei T = 60 °C über Wasser nach Beendigung der Prüfung